

UN ALGORITMO MEMÉTICO PARA EL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN-  
RUTEO CON VENTANAS DE TIEMPO PARA LA ATENCIÓN DE DESASTRES  
SÍSMICOS EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA.

MELISSA ANDREA BARRETO ROBLES

PAULA NATHALIA NIÑO NIÑO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
BUCARAMANGA  
2016

UN ALGORITMO MEMÉTICO PARA EL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN-  
RUTEO CON VENTANAS DE TIEMPO PARA LA ATENCIÓN DE DESASTRES  
SÍSMICOS EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA.

MELISSA ANDREA BARRETO ROBLES

PAULA NATHALIA NIÑO NIÑO

Trabajo de grado para optar al título de:

Ingeniero Industrial

Director

HENRY LAMOS DIAZ

PhD en Física-Matemática

Codirectora

KARIN JULIETH AGUILAR IMITOLA

Ingeniera Industrial

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
BUCARAMANGA  
2016

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	15
1. REVISIÓN DE LITERATURA.....	18
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	29
3. MARCO DE ANTECEDENTES.....	32
4. JUSTIFICACIÓN .....	35
5. OBJETIVOS .....	38
5.1 OBJETIVO GENERAL.....	38
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	38
6. MARCO TEÓRICO .....	39
6.1 LOGISTICA HUMANITARIA.....	39
6.1.1 Desastres .....	40
6.1.1.1 Gestión de desastres.....	42
6.1.1.2 Fases.....	43
6.2 OPTIMIZACIÓN COMBINATORIA .....	45
6.2.1 Problemas de optimización combinatoria .....	46
6.2.2 Complejidad computacional.....	47
6.3 Métodos de solución.....	48
6.3.1 Métodos exactos .....	49
6.3.2 Métodos aproximados .....	49
6.3.2.1 Heurísticas .....	50
6.3.2.2 Metaheurísticas .....	50
6.3.2.3 Métodos híbridos.....	51
6.3.3 Computación evolutiva .....	52
6.3.3.1 Programación evolutiva.....	52
6.3.3.2 Algoritmos genéticos .....	53
6.4 ALGORITMO MEMÉTICO.....	55
6.5 PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN-RUTEO .....	58
6.5.1 Clasificaciones del LRP.....	62

6.5.2	Métodos de solución para el LRP .....	63
6.5.3	LRP con Ventanas de tiempo .....	64
7.	FORMULACIÓN DEL LRPTW .....	66
7.1	Objetivo del LRPTW .....	66
7.2	Formulación matemática del Problema .....	66
8.	DISEÑO DEL ALGORITMO MEMÉTICO PARA EL LRPTW .....	71
8.1	REPRESENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	71
8.1.1	Decodificación .....	73
8.1.2	Función objetivo (Fitness).....	73
8.1.3	Parámetros .....	75
8.2	PASOS LÓGICOS DEL PROCESO ALGORÍTMICO .....	75
8.2.1	Población inicial.....	79
8.2.2	Selección .....	83
8.2.3	Cruce y mutación.....	84
8.2.4	Operador de mejora.....	86
9.	INSTANCIAS.....	88
9.1	VALIDACION DEL ALGORITMO.....	88
10.	CASO ESTUDIO .....	92
10.1	DISEÑO DE LA RED DE TRANSPORTE.....	92
10.2	ANÁLISIS DE MAPAS .....	94
10.2.1	Descripción de la ruta .....	96
10.2.2	Estudio de la capacidad de los albergues.....	96
10.2.3	Estudio del nivel de afectación por comuna.....	97
10.2.4	Estudio de la demanda de los puntos de encuentro .....	98
10.2.5	Descripción de las ventanas de tiempo.....	101
10.3	SUPUESTOS DEL CASO ESTUDIO.....	104
11.	RESULTADOS Y ANALISIS .....	105
11.1	PROPUESTA AL PLAN LOCAL DE EMERGENCIAS Y CONTINGENCIAS DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA.....	105
12.	CONCLUSIONES .....	117

13. RECOMENDACIONES .....	120
BIBLIOGRAFÍA.....	122
ANEXOS.....	128

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fases de la gestión de desastres. ....	43
Figura 2. Clasificación de las técnicas de optimización. ....	49
Figura 3. Algoritmo memético básico.....	57
Figura 4. Representación del estado de los albergues. ....	72
Figura 5. Representación asignación de PE.....	72
Figura 6. Representación rutas de cada albergue. ....	72
Figura 7. Ejemplo del cálculo de la función objetivo del problema.....	74
Figura 8. Diagrama del algoritmo memético para la solución del LRPTW .....	77
Figura 9. Diagrama del algoritmo memético para la solución del LRPTW .....	78
Figura 10. Diagrama de la heurística del vecino más cercano.....	82
Figura 11. Ejemplo Operador de mejora CustMove.....	87
Figura 12. Ubicación de los albergues y puntos de encuentro en el mapa.....	95
Figura 13. Ubicación de los puntos de encuentro en agrupación de manzanas..	100

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fases de la gestión de desastres. ....	44
Tabla 2. Áreas de aplicación de problemas de localización-ruteo. ....	61
Tabla 3. Clasificación del LRP. ....	62
Tabla 4. Parámetros para la población inicial. ....	75
Tabla 5. Comparación de resultados obtenidos.....	89
Tabla 6. Representación lugares en el mapa.....	95
Tabla 7. Zonas más afectadas de acuerdo a los escenarios. ....	97
Tabla 8. Habitantes a evacuar por comuna. ....	99
Tabla 9. Lista puntos de encuentro.....	106
Tabla 10. Resultados escenario 1.....	110
Tabla 11. Resultados escenario 2.....	113

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Planes locales de Emergencia.....	126
Anexo B. Heurística del vecino más cercano .....	151
Anexo C. Instancias	
Anexo D. Capacidad Albergues	
Anexo E. Puntos de encuentro y Albergues	
Anexo F. Código de Programación .....	161

Los anexos C, D y E se encuentran en carpeta adjunta en el CD.

## RESUMEN

**TÍTULO:** “UN ALGORITMO MEMÉTICO PARA EL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN-RUTEO CON VENTANAS DE TIEMPO PARA LA ATENCIÓN DE DESASTRES SÍSMICOS EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA”.\*

**AUTORES:**

BARRETO ROBLES, Melissa Andrea.

NIÑO NIÑO, Paula Nathalia.\*\*

**PALABRAS CLAVE:**

Logística humanitaria, evacuación, sismo, problema de localización-ruteo, ventanas de tiempo, algoritmo memético.

**DESCRIPCIÓN:**

En la presente investigación, se aborda un problema de localización-ruteo con ventanas de tiempo (LRPTW por sus siglas en inglés) para llevar a cabo la evacuación de afectados en caso de un desastre sísmico en la ciudad de Bucaramanga. El objetivo principal del LRPTW es localizar un número de depósitos y establecer una serie de rutas óptimas que permiten satisfacer las ventanas de tiempo de los clientes a servir. Para la solución del problema propuesto se diseñó un algoritmo memético (MA por sus siglas en inglés), que hace uso de operadores de búsqueda local, con el objetivo de minimizar el tiempo total de respuesta.

El algoritmo fue validado con las instancias de la literatura de Prodhon para el problema de localización-ruteo capacitado (CLRP por sus siglas en inglés), mediante el lenguaje de programación Matlab, debido a la inexistencia de instancias para el LRPTW. Los resultados obtenidos muestran que el algoritmo encuentra soluciones cercanas al óptimo de las instancias validadas, haciendo una comparación respecto al número de vehículos usados, ya que al tener funciones objetivos diferentes no se puede comparar directamente con los costos.

Se presenta además un caso de estudio en la ciudad de Bucaramanga para demostrar el enfoque práctico de modelado hacia la determinación de la ubicación de albergues y las rutas de evacuación de los vehículos, desde los puntos de encuentro hacia los albergues establecidos, por medio de la herramienta computacional diseñada, con el fin de lograr una atención oportuna a los afectados y mitigar las pérdidas humanas.

---

\* Proyecto de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Programa de Ingeniería Industrial. Director: PhD Henry Lamos Díaz. Coodirector: Karin Julieth Aguilar Imitola Ingeniera Industrial.

## ABSTRACT

**TITLE:** “A MEMETIC ALGORITHM FOR THE LOCALIZATION AND ROUTING PROBLEM WITH TIME WINDOWS PARA LA ATENCIÓN DE DESASTRES SÍSMICOS EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA”.\*

### **AUTHORS:**

BARRETO ROBLES, Melissa Andrea.

NIÑO NIÑO, Paula Nathalia.\*\*

### **KEYWORDS:**

Humanitarian logistics, evacuation, earthquake, location-routing problem, time windows, memetic algorithm.

### **DESCRIPTION:**

In the present investigation, a location-routing problem with time windows (LRPTW) is addressed to carry out the evacuation of affected people in the event of a seismic disaster in Bucaramanga city. The main objective of the LRPTW is to locate a number of depots and a set of optimal routes that will satisfy the time windows of the costumers to serve. To solve the proposed problem a memetic algorithm (MA), that uses local search operators, is designed in order to minimize the total response time.

The algorithm was validated with the instances of the literature of Prodhon to the capacitated location-routing problem (CLRP), through the Matlab programming language, due to the absence of instances for the LRPTW. The results show that the algorithm find near optimal solutions to the validated instances, making a comparison with the number of used vehicles, because we can't compare the costs due to the differences in the objective functions.

A case study in the city of Bucaramanga demonstrates the practical modeling approach of determining the location of shelters, evacuation routes of vehicles, and the meeting points for the established shelters through a computational tool designed in order to ensure timely attention to those affected and to mitigate the human losses.

---

\* Graduation Project.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Programa de Ingeniería Industrial. Director: PhD Henry Lamos Díaz. Coodirector: Karin Julieth Aguilar Imitola Ingeniera Industrial.

## INTRODUCCIÓN

Los desastres naturales son eventos inesperados independientes del accionar humano, de suficiente magnitud que alteran la estructura básica y el funcionamiento normal de una sociedad, los cuales pueden ocasionar víctimas, daños o pérdidas. Los desastres naturales calificados como de mayor causalidad son los huracanes, la erupción de volcanes, las lluvias y los sismos. Un sismo es un fenómeno que se produce por un rompimiento repentino en la corteza terrestre o el movimiento brusco de las placas tectónicas que la conforman. Como consecuencia se producen vibraciones que se propagan en todas direcciones y se perciben como una sacudida con duración e intensidad variables.

La más reciente catástrofe causada por un sismo ocurrió el 06 de abril de 2016 en Manabí, noroeste de Ecuador en donde un total de 660 personas murieron víctimas de éste desastre. Es catalogado como uno de los sismos más fuertes en Sudamérica y sus ondas sísmicas llegaron hasta el suroccidente de Colombia, sintiéndose en diferentes ciudades como Cali, Pasto, Popayán y Neiva.

La actividad tectónica en Colombia ha tenido manifestaciones severas. Es un país con una alta amenaza sísmica y volcánica. Varios de los más graves desastres ocurridos en Suramérica han ocurrido en Colombia. Terremotos y erupciones volcánicas que han causado un número importante de víctimas se han reportado desde épocas de la colonia. Debido a que la mayoría de la población colombiana se encuentra concentrada en grandes ciudades localizadas en las zonas de mayor amenaza o peligro y como agravantes la acción del hombre al proceso de

industrialización de los últimos años, han aumentado el potencial de desastre natural o de origen antrópico lo que resulta significativamente alto para el país.<sup>1</sup>

En Colombia se presentan gran número de fallas; en el caso concreto de Bucaramanga la ciudad es considerada como una región de alta amenaza sísmica, donde confluye el movimiento de las placas tectónicas de la cordillera oriental que la hacen más propensa a fenómenos de origen geológico. Adicionalmente la ciudad se encuentra localizada cerca del nido sísmico de Bucaramanga, uno de los más activos del mundo.<sup>2</sup>

La gestión de las operaciones de logística humanitaria se considera muy compleja debido a los riesgos e incertidumbres que acompañan cualquier desastre, esto plantea dificultades en las fases de planeación y respuesta ante una emergencia. Es por esto que se ha optado por el uso de herramientas de modelado, simulación y optimización, que facilitan la toma de decisiones y minimizan el tiempo de respuesta.<sup>3</sup> Actualmente en Bucaramanga no se cuenta con puntos de encuentro establecidos, ni con rutas definidas para la evacuación de las zonas afectadas, que faciliten el transporte de estos hacia albergues y zonas seguras; por lo tanto, desde la investigación de operaciones se propone abordar estos problemas de la etapa de respuesta a desastres, mediante un modelo de localización y ruteo (LRP por sus siglas en inglés) que permita identificar la ubicación de los puntos de encuentro y establecer las rutas de los vehículos para la evacuación de las zonas afectadas en un desastre por sismo. Además se consideran ventanas de tiempo

---

<sup>1</sup> CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). Información para la gestión de riesgo de desastres. Estudio de caso de cinco países: Colombia. México. 2007, pág. 29-30.

<sup>2</sup> CLOPAD. Caracterización general del escenario del riesgo por sismo en Bucaramanga. 2011. P. 15—24.

<sup>3</sup> SAFEER, M, et al. Analyzing transportation and distribution in emergency humanitarian logistics. En: Elsevier science Ltd. 2014. vol. 97, p.2248—2258.

para darle un enfoque más real y darle prioridad a la minimización de tiempos de respuesta, el modelo propuesto es resuelto mediante un algoritmo memético.

## 1. REVISIÓN DE LITERATURA

La gestión del riesgo de desastres es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, instrumentos y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible<sup>4</sup>.

Sin importar la naturaleza del evento, en los desastres se identifican tres grandes etapas: pre-desastre, de respuesta y post-desastre. Cada una de éstas enmarca una serie de operaciones. La etapa pre-desastre aborda las operaciones de preparación, evaluación del riesgo, prevención y mitigación siendo esta última el diseño de la red logística que permite una eficiente operación en términos de reducción del impacto del desastre. La respuesta al desastre trata las actividades ocurridas inmediatamente después del fenómeno natural como lo son la evacuación y la evaluación de daños y pérdidas. La etapa post-desastre enmarca dos operaciones: la rehabilitación y reconstrucción, las operaciones de rehabilitación tienen como propósito restablecer los servicios básicos; por su parte las operaciones de reconstrucción buscan la reactivación de la población y de la zona<sup>5</sup>.

Este proyecto está enfocado esencialmente en la etapa de pre-desastre de la logística de emergencia. Dentro de esta etapa se destaca la actividad de ubicación de puntos de encuentro y albergues, ya que generalmente las personas no saben a dónde dirigirse o reunirse al ocurrir un desastre de gran magnitud, y como consecuencia de un desastre, un considerable número de personas queda sin

---

<sup>4</sup> CONGRESO DE COLOMBIA. Gestión del riesgo, responsabilidad, principios, definiciones y Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. 2012. LEY No.1523. Capítulo 1.[En línea] Disponible en:[<http://www.ifrc.org/docs/idrl/1057ES.pdf>]

<sup>5</sup> CAUNHYE, Aakil; NIE, Xiaofeng y POKHAREL, Shaligram. Optimization models in emergency logistics: A literature review. En: Socio-Economic Planning Sciences. 2012. vol. 46, no. 1, p. 4-13.

hogar y se deben establecer zonas de refugio especialmente diseñadas para abastecer las necesidades primarias de la población afectada hasta que se complete el proceso de la etapa post-desastre.

Es conocido que abordar las decisiones de localización y ruteo de manera independiente puede dar lugar a resultados de planificación altamente sub-óptimos<sup>6</sup>, que en el caso de la logística humanitaria no es permitido. Un ejemplo de esto es el terremoto que afectó al suroeste de Indonesia, donde los suministros disponibles para abastecer a la población afectada no pudieron ser distribuidos, debido a que no se tenían los canales de distribución definidos, no había planeación ni preparación para la atención de desastres<sup>7</sup>. Por lo anterior, el problema de ubicación de puntos de encuentro o puntos de reunión y las decisiones de ruteo de vehículos para la recolección de afectados pueden abordarse de manera conjunta mediante un problema de localización-ruteo con ventanas de tiempo (LRPTW por sus siglas en inglés), con el objetivo de minimizar los costos de ubicación y de transporte, y más importante aún, la minimización de los tiempos de respuesta para una rápida distribución de recursos o recolección de afectados.

El LRP se ha estudiado durante décadas, y la comunidad investigativa ha sido muy activa en los últimos años. Una de las primeras publicaciones en relación con el LRP fue presentada por Boventer (1961)<sup>8</sup>, donde discute la determinación simultánea de los costos de transporte y los pagos de renta en sitios de producción y puntos de consumo. Posteriormente Maranzana (1964)<sup>9</sup>, propone un algoritmo para la solución del problema y resalta que “la localización de fábricas, almacenes y puntos de suministro en general es a menudo influenciado por los

---

<sup>6</sup> SALHI, S., & RAND, G. K. The effect of ignoring routes when locating depots. *European Journal of Operational Research*. 1989. Vol.39. No.2.

<sup>7</sup> APTE, Aruna. *Humanitarian Logistics: A New Field of Research and Action*. Now publishers. 2010. Vol. 3, No. 1. p. 1-100.

<sup>8</sup> BOVENTER, E. The relationship between transportation costs and location rent in transportation problems. *Journal of Regional Science*. 1961. Vol.3. No.2.

<sup>9</sup> MARANZANA, F. E. On the location of supply points to minimize transportation costs. *Operational Research Quarterly*. 1964. Vol.15. No.3.

costos de transporte”, aunque estrictamente hablando se incorpora la ruta más corta, en lugar de ruteo de vehículo, en el problema de localización.

En enfoques clásicos para abordar este tipo de problemas se realizan estimaciones de los parámetros del sistema y se trabaja como un problema determinístico. El primer problema determinista de localización-ruteo fue introducido en 1977 por Chan y Hearn<sup>10</sup>, donde asumen que los clientes son localizados sobre un plano con distancias rectilíneas, y se plantea el problema de forma que permitía obtener el valor mínimo de la función objetivo. Chan y Francis (1976)<sup>11</sup> localizan los nodos clientes sobre un diagrama de árbol usando un procedimiento similar al de Chan y Hearn; posteriormente Or & Pierskalla (1979)<sup>12</sup> buscan solucionar el problema de sistemas de bancos de sangre, proponen un algoritmo para decidir el número de bancos, su localización, la asignación de hospitales a los bancos, la forma de operación de las rutas de suministro a los hospitales de forma que el costo del sistema sea el mínimo.

Por lo general, el transporte en las operaciones de socorro implica interacciones complejas entre diferentes actores y tareas y, por lo tanto, puede ser modelado como un problema integrado que consiste en un conjunto de sub-problemas interdependientes. Uno de los modelos más comunes en el transporte de emergencia es aquel que integra distribución de suministros y ruteo para vehículos. Tian et al.<sup>13</sup> construyeron un modelo de optimización y diseñaron un algoritmo PSO donde la función de aptitud para la evaluación de las partículas se define mediante la combinación de múltiples objetivos. Sin embargo, para

---

<sup>10</sup> CHAN, A. W., & HEARN, D. W. A Rectilinear Distance Round-Trip Location Problem. *Transportation Science*. 1977. Vol.11. No.2.

<sup>11</sup> CHAN, A. W., & FRANCIS, R. L. A Round-Trip Location Problem on a Tree Graph. *Transportation Science*.1976. Vol.10. No.1.

<sup>12</sup> OR, I., & PIERSKALLA, W. P. A Transportation Location-Allocation Model for Regional Blood Banking. 1979. Vol.11. No.2.

<sup>13</sup> TIAN, J.; MA, W.Z.; WANG, Y.L.; WANG, K.L. Emergency supplies distributing and vehicle routes programming based on particle swarm optimization. *Syst. Eng. Theory Pract*. 2011. Vol.31. p.898–906.

instancias de gran tamaño, el algoritmo se ve atrapado fácilmente por óptimos locales.

Yi y Kumar (2007)<sup>14</sup> consideran un modelo de planificación de la logística de emergencia, que consiste en el envío de productos a los centros de distribución y la evacuación de los heridos a centros médicos. Propusieron un algoritmo ACO mejorado que descompone el problema en dos fases, es decir, la construcción de la ruta del vehículo y el envío de múltiples productos básicos. Los sub-problemas se resuelven de manera iterativa. Los resultados muestran que la calidad de la solución ACO alcanzada dentro del tiempo de ejecución es aceptable para el planificador en una situación de emergencia real en el que existe incertidumbre continua y dinamismo de información.

Goerigk et al. (2014)<sup>15</sup> proponen un modelo de optimización macroscópica multicriterio y se desarrolla un algoritmo genético para resolver heurísticamente el problema de evacuación de un área urbana. Se crea una población inicial factible con ayuda de un pequeño programa entero para calcular el número mínimo de albergues. En experimentos computacionales, usando datos del mundo real, demuestran la eficacia del enfoque dado y comparan diferentes niveles de datos agregados. Por otra parte, Chou et al.<sup>16</sup> presentan un algoritmo genético multiobjetivo de longitud dinámica para resolver el problema de logística de emergencia. El método propuesto puede generar horarios de rutas óptimas con número limitado de vehículos de rescate, por ende todo el proceso puede ser más eficiente y eficaz.

Aunque el LRP se ha intentado resolver mediante algoritmos exactos, al ser un problema de tipo NP-hard, resulta difícil solucionarlo mediante técnicas exactas,

---

<sup>14</sup> YI, W.; KUMAR, A. Ant colony optimization for disaster relief operations. *Transp. Res. Part E: Logist. Transp. Rev.* 2007. Vol.43. p.660–672.

<sup>15</sup> GOERIGK, M., et al. A comprehensive evacuation planning model and genetic solution algorithm. *Transportation Research Part E.* 2014. Vol.71. p.82–97.

<sup>16</sup> CHOU, Ta-Yuan, et al. Multiobjective dynamic length genetic algorithm to solve the emergency logistics problem. 2010.

especialmente al aumentar el número de clientes o el número de lugares candidatos para la ubicación de las instalaciones, es por esto que ha sido tratado mediante métodos aproximados que buscan encontrar una buena solución al problema. Contribuciones del algoritmo memético aplicadas al LRP han sido presentadas por:

Prins et al. (2006b)<sup>17</sup> que proponen un algoritmo memético con gestión de la población (MAIPM) para el problema de asignación de ruta fusionada a diferentes instalaciones. (MAIPM) se caracteriza por una pequeña población que se genera inicialmente por medio del algoritmo extendido aleatorio de Clarke y Wright (RECWA) y un método basado en el vecino más cercano al azar, ambos mejorados por búsqueda local (LS). Periódicamente, una nueva población se genera manteniendo sólo la mejor solución de la población anterior.

Duhamel et al. (2008)<sup>18</sup> proponen un algoritmo memético. Para generar las soluciones iniciales se utilizan tres heurísticas clásicas y un RECWA. La evaluación de aptitud se basa en un procedimiento de separación que utiliza un algoritmo de etiquetado a base de programación dinámica para calcular la solución óptima sujeta a la capacidad del vehículo, tamaño de flota, y limitaciones de la capacidad de las instalaciones.

Entre las contribuciones del LRP enfocado a la ayuda humanitaria o la gestión de desastres se encuentran, Ukkusuri y Yushimito (2008)<sup>19</sup>, que desarrollan una formulación matemática para modelar el posicionamiento previo de suministros para desastres como un problema de ubicación de instalaciones que da cuenta del

---

<sup>17</sup> PRINS, C., PRODHON, C., and WOLER CALVO, R. A memetic algorithm with population management (MAjPM) for the capacitated location-routing problem. *EvoCOP*. 2006. Vol. 3906. p.183-194.

<sup>18</sup> DUHAMEL, C., et al. A memetic approach for the capacitated location routing problem. In *International Workshop on Metaheuristics for Logistics and Vehicle Routing EU/Meeting*. 2008.

<sup>19</sup> UKKUSURI, S.V., and YUSHIMITO, W.F. Location Routing Approach for the Humanitarian Prepositioning Problem. *Journal of the Transportation Research Board*. Washington, D.C. 2008. No. 2089. pp. 18-25.

enrutamiento de vehículos y las posibles rupturas en la red de transporte. El enfoque utiliza una combinación de la vía más fiable y un modelo de programación entera para encontrar la ubicación óptima de los suministros. Se muestra que el problema se puede resolver de manera eficaz incluso para redes de transporte de mediana y gran escala.

Cuatro años más tarde, Abbas Afshar y Ali Haghani (2012)<sup>20</sup> tienen como objetivo desarrollar un modelo comprensivo (exhaustivo) que describa la logística integrada de operaciones en respuesta de desastres naturales. Proponen un modelo matemático que controla el flujo de varios productos de socorro desde las fuentes a través de la cadena de suministro y hasta que se entreguen a las manos de los destinatarios. Para los casos más simples, el solver comercial fue capaz de encontrar soluciones óptimas, sin embargo, para casos más complejos, CPLEX fue incapaz de encontrar la solución óptima dentro de un tiempo computacional razonable. Se concluye que algoritmos de mejor solución o heurísticas son necesarios para hacer frente a instancias de problemas muy grandes.

Wang et al. (2014)<sup>21</sup> desarrolla un modelo para el problema de localización-ruteo difusa para optimizar el sistema logístico de emergencia tras un terremoto considerando demanda difusa de materiales de socorro y recursos limitados. El objetivo del modelo es reducir al mínimo el costo total y el tiempo de alivio del sistema. Además, esta investigación propone un algoritmo genético mejorado basado en la transformación del coeficiente ponderado. El resultado de un ejemplo numérico muestra que el modelo y el algoritmo son eficaces para la resolución de la toma de decisiones conjunta de los problemas de localización-asignación y ruteo de vehículos después de un terremoto.

---

<sup>20</sup> A. AFSHAR and A. HAGHANI. Modeling integrated supply chain logistics in real-time large-scale disaster relief operations. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2012. vol. 46. No.4. p. 327–338.

<sup>21</sup> WANG, Shaoren; MA, Zujun y ZHUANG, Bochao. Fuzzy location-routing problem for emergency logistics systems. *Computer modeling & New technologies*. 2014. Vol.18. No.2. p. 265-273.

Wisetjindawat et al (2015)<sup>22</sup> presentan el análisis de una operación de socorro en Aichi Prefecture, Japan. Tienen en cuenta la posible degradación de la red de carreteras mediante la inclusión de un elemento estocástico para representar la posibilidad de fallo de enlace que depende de la intensidad del terremoto en cada subregión. Los resultados sugieren la mejor preparación de los recursos e identificar destinos vulnerables que son más propensos a ser de afectados por el desastre. Aquí el LRP se utiliza con el fin de identificar las ubicaciones más adecuadas de los centros de actividad para la entrega de suministros de socorro a los centros secundarios. El problema se resuelve como un problema de asignación única sin restricciones de capacidad usando un algoritmo genético y se hace simulación de escenarios con el propósito de que se pueda ayudar a los planificadores a evaluar y hacer planeación estratégica con el fin de mejorar la eficiencia de las operaciones de socorro.

En logística humanitaria, la respuesta inicial debe ser recibida en las primeras 72 horas después de la ocurrencia de un terremoto, como han establecido Ozdamar, Ekinzi, & Kucukyazici (2004)<sup>23</sup>, Yi & Ozdamar (2007)<sup>24</sup>, Balcik, Beamon & Smilowitz (2008)<sup>25</sup>, Salmeron & Apte (2009)<sup>26</sup>, etc. Las primeras 12 horas son críticas y son llamadas el tiempo de alivio estándar (SRT, por sus siglas en ingles). Las organizaciones gubernamentales y no gubernamentales deben evaluar rápidamente la situación y comenzar a enviar los artículos de socorro desde los almacenes locales a los puntos de demanda dentro de este límite de tiempo.

---

<sup>22</sup> WISINEE, Wisetjindawat, et. al. Integrating a Stochastic Failure of the Road Network and a Road Recovery Strategy into the Planning of Goods Distribution in the Aftermath of a Large-Scale Earthquake. 2015.

<sup>23</sup> OZDAMAR, L., EKINZI, E., & KUCUKYAZICI, B. Emergency logistics planning in natural disasters. *Annals of Operations Research*. 2004. No.129. p. 217–245.

<sup>24</sup> YI, W., & OZDAMAR, L. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities. *European Journal of Operational Research*. 2007. No 179. p.1177-1193.

<sup>25</sup> BALCIK, B., BEAMON, B. M., & SMILOWITZ, K. Last mile distribution in humanitarian relief. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2008. Vol.12(2). p. 51–63.

<sup>26</sup> SALMERON, J., & APTE, A. Stochastic optimization for natural disaster asset prepositioning. Forthcoming, *Production and Operations Management*. 2010.

Cualquier violación de la restricción SRT o la falta de suministro de bienes de ayuda podrían causar sufrimiento y pérdida a las personas afectadas y debe ser altamente penalizada en un proceso de planificación y toma de decisiones.

Otros autores en la literatura que tienen en cuenta el SRT como horizonte de planeación para la planificación de operación de rescate son:

Morteza Ahmadi et al. (2015)<sup>27</sup> quienes proponen un modelo de localización-ruteo multi-deposito considerando fallas en la red, uso de múltiples vehículos y tiempo de alivio estándar (SRT). El modelo determina la localización de depósitos locales y rutas para la distribución de última milla después de un terremoto. Un algoritmo de búsqueda en la vecindad variable (VNS) se usa para resolver el problema determinístico. Pequeñas instancias se han resuelto de forma óptima en GAMS y los resultados computacionales del caso estudio muestran que las demandas insatisfechas se pueden reducir significativamente al costo de mayor número de depósitos locales y vehículos.

Bozorgi-Amiri y Khorsi<sup>28</sup> describen un problema de localización-ruteo que implica un horizonte de tiempo de planificación que consiste en un número determinado de periodos de tiempo en donde se trata la demanda y la oferta con varianza en el tiempo. Se establece entonces un horizonte de planificación de tres días para las operaciones de rescate y suministro, ya que la posibilidad de supervivencia más allá de esta ventana de tiempo disminuye drásticamente. El modelo presentado logra tres objetivos: la reducción al mínimo de la demanda insatisfecha, el tiempo de viaje y los costos.

Una manera de hacer frente a la restricción de tiempo de alivio estándar (SRT) es hacer uso de ventanas de tiempo duras en los puntos de demanda donde se

---

<sup>27</sup> AHMADI, Morteza and SEIFI, Abbas. A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district. *En: Elsevier. Transportation Research Part E. 2015. Vol.75. p. 145–163.*

<sup>28</sup> BOZORGI-AMIRI, A. & KHORSI, M. A dynamic multi-objective location-routing model for relief logistics planning under uncertainty on demand, travel times and cost parameters. *Int J Adv Manuf Technol. 2016. Vol.85. p.1633.*

reunirán las personas afectadas o a ser evacuadas luego de un desastre. La restricción de ventana de tiempo indica el nivel de urgencia para la entrega de los elementos necesarios o la prioridad de evacuación en cada punto de demanda<sup>29</sup>. Investigaciones de este estilo han sido realizadas por:

Lin et al. (2011)<sup>30</sup> con el diseño de un modelo logístico para la distribución de los elementos prioritarios para las operaciones de logística aplicable a un caso de desastre. El modelo considera múltiples elementos, múltiples vehículos, múltiples periodos de tiempo, ventanas de tiempo suaves y el escenario de una estrategia de entrega dividida, y es formulado como un modelo de programación multiobjetivo. Se introducen dos enfoques heurísticos para la solución del problema, uno de ellos es un enfoque basado en un algoritmo genético. Los resultados muestran que el modelo propuesto supera el modelo de Balcik et al.<sup>31</sup> en cuanto a la distribución de elementos priorizados durante varios periodos de tiempo.

Li Shouying y Zhou Huijuan (2014)<sup>32</sup> establecen un modelo del LRPTW con tiempo de rescate difuso para la optimización de las rutas de los botes y la ubicación de refugios en la búsqueda de víctimas en inundaciones. Un algoritmo genético híbrido (algoritmo memético) que contiene reglas heurísticas fue diseñado, y el análisis de la prueba de simulación indica que el modelo y el algoritmo proporcionan un método eficiente para la toma de decisiones en la búsqueda de víctimas en inundaciones.

---

<sup>29</sup> NIKBAKSH, E. & ZANJIRANI FARAHANI, R. Logistics Operations and Management. Humanitarian logistics planning in disaster relief operations. p.312-315.

<sup>30</sup> LIN Y-H, BATTAR, ROGERSON PA, BLATT A, FLANIGAN M. A logistics model for emergency supply of critical items in the aftermath of a disaster. Socio-economic Plan Sci. 2011. Vol.45(4). p.132-45.

<sup>31</sup> BALCIK, B., BEAMON, BM. y SMILOWITZ, K. Last mile distribution in humanitarian relief. J Intell Trans Syst. 2008. Vol.12. p.51-63.

<sup>32</sup> SHOUYING, Li and HUIJUAN, Zhou. Optimization model of fuzzy location-routing problem of victim search in flood disaster. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. 2014. Vol.6. No.6. p.208-280.

Song et al. (2009)<sup>33</sup> presentan una técnica de modelado de optimización para desarrollar un plan de evacuación para los residentes que dependen de transporte público en caso de un desastre naturales como un huracán. La operación de evacuación de transito se formula como un LRPTW con incertidumbre de demandas. El objetivo del estudio es minimizar el tiempo total de evacuación. Los resultados experimentales muestran que el algoritmo genético híbrido utilizado para la solución del problema se comporta mejor en calidad y eficiencia que los algoritmos genéticos tradicionales.

Haghani y Oh (1996)<sup>34</sup> determinan planes detallados de enrutamiento y programación para varios modos de transporte que lleven mercancía, desde varios puntos de suministro, en una operación de socorro. Se formula un modelo de programación entera mixta multiservicio y flujo de red multimodal con ventanas de tiempo en una red espacio-tiempo con el objetivo de minimizar la suma de los costos a través de todos los periodos de tiempo. Dos algoritmo de solución heurísticos se desarrollan; el primero utiliza un método de relajación lagrangiana, y el segundo emplea un proceso de corrección iterativa. Las técnicas de solución propuestas funcionan bien y proporcionan resultados bastante buenos para el problema. El algoritmo de solución II se comporta mejor que el algoritmo de solución I en términos de precisión y tiempo de ejecución.

En los últimos años, los métodos meta-heurísticos bio-inspirados, incluyendo algoritmos evolutivos (AE) y algoritmos basados en la inteligencia de enjambre (SI), han despertado un gran interés en la investigación y se han aplicado a la planificación del transporte y la programación de emergencia en muchos

---

<sup>33</sup> SONG, R., HE, S. y ZHANG, L. Optimum Transit Operations during the Emergency Evacuations, *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. 2009. vol. 9, p. 154-160.

<sup>34</sup> HAGHANI, A., AND OH, S.C. "Formulation and solution of a multi-commodity, multi-modal network flow model for disaster relief operations. *Transportation Research*. 1996. Vol. 30, No. 3. p. 231–250.

problemas del mundo real debido a su eficiencia y robustez en la búsqueda en espacios de soluciones muy grandes. Es por esto que es debido hacer uso de un algoritmo memético para solución del LRPTW en un escenario de desastre sísmico en la ciudad de Bucaramanga.

En Colombia, se encuentran muy pocos datos específicos de investigaciones realizadas en logística humanitaria y aplicación de programación matemática para abordar estos problemas. De acuerdo a la Ley de gestión del riesgo todos los municipios colombianos, deben adoptar la política pública de Gestión del Riesgo, donde deben elaborar el Plan Municipal de Gestión del Riesgo y la elaboración de la estrategia para la respuesta a emergencias<sup>35</sup>. El municipio de Bucaramanga se encuentra aún en el proceso de construcción del Plan Municipal de Gestión del Riesgo y la elaboración de la estrategia para la respuesta a emergencias, por lo tanto hace falta planeación estratégica en cuanto a la ubicación de puntos de encuentro y albergues temporales, lo que aumenta considerablemente la vulnerabilidad de la población ante un sismo de gran magnitud.

Es por esto que se ha hecho una revisión de los planes locales de emergencia de diferentes lugares (ver anexo A), para identificar sus enfoques en el tema de atención a emergencias, para así dar una propuesta centrada en localización de albergues y evacuación de personas en la ocurrencia de un desastre por sismo.

En conclusión, se evidencian pocos trabajos de investigación que apliquen técnicas de investigación de operaciones en la localización de instalaciones y ruteo de vehículos para logística humanitaria en Colombia.

---

<sup>35</sup> CONGRESO DE COLOMBIA. Gestión del riesgo, responsabilidad, principios, definiciones y Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. 2012. LEY No.1523. Capítulo 1. [En línea] Disponible en:[<http://www.ifrc.org/docs/idrl/1057ES.pdf>].

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El LRP se define como un problema jerárquico donde el objetivo es resolver el problema de ubicación de la instalación (problema principal), pero para lograrlo se necesita resolver, al mismo tiempo, el problema de ruteo de vehículos (sub-problema). Por su parte, el dimensionamiento, es un proceso intrínseco en la dinámica de localización-ruteo en donde se asigna a cada instalación (en caso de ser más de una) los clientes a visitar, para posteriormente realizar las rutas que los contengan. Estas definiciones implican un enfoque integrado para la solución, es decir, tanto la ubicación como el ruteo están interrelacionados e influyen en la respuesta del problema.<sup>36</sup>

El problema de localización y ruteo ha evolucionado enormemente desde su introducción en los años sesenta, donde sus características principales pueden variar según el objetivo del problema. Diferentes enfoques se le han dado y se han clasificado según su nivel jerárquico, naturaleza de la demanda, número de instalaciones, tamaño de flota, capacidades, horizontes de planeación y restricciones de tiempo, entre otras, esto para tratar de adaptar el problema a la realidad.

Al introducir las restricciones de tiempo hace que el problema se enfoque en el cumplimiento oportuno y la satisfacción de los clientes en un rango de tiempo. Para estas restricciones se usan ventanas de tiempo suaves con plazos libres, es decir, se penaliza la atención antes o después del tiempo establecido pero puede servir al cliente, y las ventanas de tiempo duras con plazos estrictos donde solo y únicamente se puede servir al cliente en un lapso de tiempo establecido.

---

<sup>36</sup> NAGY, G., AND SALHI, S. Location-routing: Issues, models and methods. *European Journal of Operational Research*. 2007. Vol.177(2). p. 649–672.

El presente trabajo se centra en el problema de localización y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo duras enfocado en la logística humanitaria; Es por esto que el tema de la reducción de tiempos se vuelve el objetivo principal del problema. Eventos climáticos y naturales como huracanes, maremotos y terremotos desencadenan un sin número de necesidades que atender en tiempo límite. Es aquí donde se han identificado fallas en cuanto al diseño de las operaciones de socorro, lo que afirma que la planeación de la logística humanitaria debe ser un punto clave a determinar antes de la ocurrencia de un desastre.

Este problema de planeación para la atención del post desastre se modela como un problema de localización, en el cual se tienen en cuenta la determinación de rutas y las posibles interrupciones en la red. Claramente, la eficiente atención y la toma adecuada de las decisiones, contribuye sin duda a reducir los tiempos de respuesta posteriores a la emergencia, lo cual se traduce en vidas salvadas<sup>37</sup>.

El problema de localización y el problema de ruteo son considerados NP-Hard por ende el LRP también pertenece a la misma categoría de problema. Algoritmos exactos han sido capaces de demostrar optimalidad para instancias pequeñas (menos de 100 clientes), pero con tiempos computacionales no razonables. Es por esto que el uso de algoritmos heurísticos y metaheurísticos han sido utilizados para encontrar soluciones cercanas a la óptima con instancias de mayor tamaño. Estas técnicas no aseguran la obtención de la solución óptima al problema planteado; Sin embargo, son capaces de ofrecer una solución válida, destacándose por la eficiencia en cuanto al tiempo y los recursos que consumen para poder ofrecer dicha solución.

La propuesta presentada para dar solución a este problema es un algoritmo memético, que emplea un algoritmo de utilización híbrido para la diversificación de

---

<sup>37</sup> UKKUSURI, S. V., & YUSHIMITO, W. F. A methodology to assess the criticality of highway transportation networks. J. Transp. Secur. 2009. Vol.2(1-2). p. 29–46.

las soluciones. El algoritmo memético, a diferencia del genético, cuenta con un operador de mejora de búsqueda local que busca acelerar el descubrimiento de buenas soluciones, o alcanzar soluciones que serían inalcanzables si solo se aplicara evolución genética<sup>38</sup>. Esto se debe a que la optimización de los individuos permite que el AM desarrolle una exploración mucho más dirigida hacia las regiones del espacio de búsqueda que poseen las mejores soluciones.

La eficiencia del algoritmo desarrollado o diseñado se evalúa en las instancias del benchmarking propuestas por Prodhon<sup>39</sup>, para el problema de localización-ruteo. Es debido probar el algoritmo en estas instancias ya que actualmente no existen datos en la literatura para el problema de localización-ruteo con ventanas de tiempo.

---

<sup>38</sup> GOLDBERG, D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley, Reading. 1989.

<sup>39</sup> PRODHON, CAROLINE. [sitio web]. Francia: Instancias de Prohon para el LRP. [Consulta: 20 septiembre 2016]. Disponible en: [http://prodhonc.free.fr/Instances/instances\\_us.htm](http://prodhonc.free.fr/Instances/instances_us.htm).

### 3. MARCO DE ANTECEDENTES

Se han desarrollado proyectos a nivel de pregrado y maestría con enfoque en la logística humanitaria para ayudar a la planeación y respuesta de la gestión de desastres, que buscan optimizar recursos y minimizar los tiempos de atención.

En el 2012, Hernández y Barrera<sup>40</sup>, desarrollaron un proyecto que lleva como título “Un algoritmo evolutivo para el problema de distribución de recursos post-desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga”, el cual consiste en una investigación donde se aborda el problema de ruteo de vehículos capacitados (CVRP) para llevar a cabo la distribución de recursos en caso de un desastre sísmico en la ciudad de Bucaramanga. El objetivo principal del CVRP es encontrar una serie de rutas óptimas de entrega, que permitan satisfacer la demanda de los clientes. Desde la perspectiva de la optimización, el CVRP es un problema de optimización combinatoria catalogado de tipo NP-Hard debido a su complejidad computacional. Se dio solución al problema del CVRP mediante un algoritmo de colonia artificial de abejas que es propuesto para minimizar la distancia total recorrida, mejorado mediante el operador de vecindad (Swap Mutación) y un operador de cruce asexual.

El aporte de este proyecto se obtiene desde la revisión de la literatura donde de manera clara se da una introducción a los conceptos de ayuda humanitaria, complejidad computacional, optimización combinatoria, el problema de ruteo de vehículos y la computación evolutiva hasta el diseño de la red en donde se localizaron los albergues (hay que aclarar que Bucaramanga no cuenta con alberges establecidos en su plan de emergencia) a donde se deben llevar los

---

<sup>40</sup> HERNÁNDEZ, Angie y BARRERA, Andrés. Un algoritmo evolutivo para el problema de distribución de recursos post-desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. 2016.

suministros de ayuda desde el centro de distribución establecido por el plan de emergencias local de la ciudad de Bucaramanga.

Para el tema de localización Ortiz<sup>41</sup> en 2014, a través de su investigación “Propuesta de planificación de contingencias para la reducción del riesgo de desastres en el centro metropolitano de Concepción”, aborda el problema de localización de albergues de emergencia en respuesta a un desastre, con el propósito de satisfacer la necesidad de refugio de las personas afectadas ante este tipo de eventos, ya sea un sismo o un tsunami. En su investigación, propone un modelo que minimiza el costo de asignar manzanas a albergues y almacenes a albergues, proporcionando información sobre cantidad de personas refugiadas, albergues habilitados, almacenes acondicionados y el costo tanto de albergar como de abastecer. Ante esta situación, Ortiz define un conjunto de nodos que representan la población, los cuales corresponden a los centroides de las manzanas censales del censo realizado el año 2002 en el centro metropolitano de Concepción, nodos que necesariamente deben ser asignados a un albergue. También se consideró a los supermercados de la zona estudiada como centros de abastecimiento; y a la red de colegios y escuelas pertenecientes a la localidad respectiva como albergues de emergencia.

Esta investigación evidencia la importancia de una planificación de contingencias para el apoyo de toma de decisiones en el ámbito logístico, también en el ámbito de la localización de albergues de emergencia ante un desastre natural, para así disponer de lugares previamente definidos para este fin. En cuanto a la presente investigación, aporta el uso de centroides en las manzanas para así poder ubicar a los habitantes, dividirlos en grupos y poderlos asignar a los puntos de encuentro en donde van a ser recogidos y llevados a los albergues.

---

<sup>41</sup> ORTIZ, Pablo. Propuesta de planificación de contingencias para la reducción del riesgo de desastres en el centro metropolitano de concepción. En: Universidad del Bío-bío, Chile. 2014.

Para abordar el tema de localización-ruteo en situaciones de emergencia, Reyes<sup>42</sup> dentro de su trabajo “Localización de instalaciones y ruteo de personal especializado en logística humanitaria post-desastre - caso inundaciones” se enfoca en determinar propuestas de solución para el problema de localización de un punto de distribución y múltiples albergues considerando el riesgo de inundación asociado a la zona, además del problema de ruteo del personal especializado que permita aliviar las calamidades médicas y psicológicas entre otras presentes en la población afectada en una situación post-desastre. El objetivo de Reyes en su investigación es diseñar un modelo logístico post-desastre para el caso de inundaciones repentinas, que permita a los organismos de socorro gestionar de manera eficiente la localización de puntos estratégicos de instalaciones, y el ruteo del personal especializado.

Para el presente trabajo se considera que es necesario trabajar al mismo tiempo la localización y el ruteo debido a que se mejora el tiempo de respuesta ante un desastre, por lo que el aporte de este trabajo es de suma importancia, haciendo 3 propuestas para abordar el problema en donde se describe cada una y se da detalladamente los pasos para llegar a su solución, algunos objetivos que tienen las propuestas son la minimización de los tiempos de respuesta, tiempos de viaje y tiempos de atención a los afectados. Finalmente la investigación muestra los resultados de las propuestas bajo un escenario planteado a partir de algunos parámetros y características reales de una inundación que se dio en el 2010 en un municipio de Colombia.

---

<sup>42</sup> REYES, Lorena. Localización de instalaciones y ruteo de personal especializado en logística humanitaria post-desastre. caso inundaciones. En: Universidad de la Sabana, Chía. 2015.

## 4. JUSTIFICACIÓN

Un desastre es una perturbación o interrupción del funcionamiento normal de un sistema que se puede originar de dos formas: los naturales que son impredecibles y los que son consecuencias de la acción humana. Los desastres naturales causan un fuerte impacto en la población, pueden ocasionar pérdidas humanas, materiales, económicas o afectar una fuente de vida con la cual el hombre contaba. Es por esto que la logística humanitaria ha centrado sus esfuerzos en la planeación, desarrollo, ejecución y control eficiente y efectivo de estrategias que contribuyan a satisfacer las necesidades del beneficiario final para mitigar o prevenir los daños y pérdidas que podrían ocurrir después de un desastre natural o humano.

En los países industrializados, las pérdidas de vida se ven limitadas a la disponibilidad de sistemas eficaces de evacuación, alerta temprana, aplicación de estándares, códigos de construcción más estrictos y mejor planificación del desarrollo urbano. En cambio, en los países en desarrollo, el número de muertes suele incrementar debido a su mayor vulnerabilidad por falta de sistemas de pronósticos y evacuación, también carecen de los recursos necesarios para enfrentarse a un desastre y no cuentan con la infraestructura adecuada para soportar ni prever los fenómenos naturales<sup>43</sup>.

Colombia hace parte de los países en vía de desarrollo, que debido a su ubicación geográfica está constituido por una amplia diversidad geológica, geomorfológica, hidrológica y climática, la cual se expresa en un conjunto de fenómenos que representan una potencial amenaza para el desarrollo social y económico del país. Se localiza en la esquina noroccidental de Suramérica, el 35% del territorio está

---

<sup>43</sup> JOVEL, Roberto. Los desastres naturales y su incidencia económico-social, en Revista de la CEPAL. 1989. Santiago de Chile. No.38.

ubicado en la Cordillera de los Andes, resultado de una larga evolución durante la cual placas tectónicas chocan entre sí, lo que da origen a un complejo sistema montañoso que recorre el país de sur a norte, y que se manifiesta en una importante actividad sísmica y volcánica <sup>44</sup>. Según un estudio realizado por el Banco Mundial y el Fondo Mundial para la Reducción y Recuperación de Desastres el 87% de colombianos se encuentran en zona de amenaza sísmica.<sup>45</sup>

La región de Bucaramanga es una de las más sísmo activas de todo el territorio colombiano; su alta tasa de producción de sismos en los últimos años la ubica como una de las de mayor peligro sísmico en todo el mundo<sup>46</sup>. El Nido Sísmico que afecta a Bucaramanga se encuentra localizado a unos 35 Km al sur de la ciudad, en el área de la Mesa de los Santos a una profundidad de 160 Km, donde convergen la placa tectónica de Nazca, la placa Continental de Suramérica y la placa del Caribe, además se destacan 4 fallas reales y una inferida las cuales se distribuyen a lo largo del territorio y afectan el área del municipio de Bucaramanga con su activación continua y persistente de temblores de baja/media intensidad.

Los antecedentes geológicos permiten hacer una estimación de la magnitud que se encuentra entre 6.7 y 7.1 en la escala de Richter, definiendo un nivel de riesgo sísmico para la zona de la ciudad de Bucaramanga. Por esta razón se hace necesario contar con un plan local de emergencias que permita dar una respuesta adecuada y eficaz al momento que se presente un desastre por sismos en la ciudad, requiriendo de la localización de puntos de encuentro y del diseño de rutas de transporte enfocada a salvaguardar las vidas humanas y minimizar el impacto socioeconómico y ambiental.

El Plan de Ordenamiento Territorial Bucaramanga 2013-2027 así como el Plan Municipal de la Gestión del Riesgo de Desastres PMGRD (Versión 2013)

---

<sup>44</sup> BANCO MUNDIAL. Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. Bogotá, Colombia. 2012. Primera edición. p. 11-72.

<sup>45</sup> BANCO MUNDIAL. Op. Cit. p. 63-69.

<sup>46</sup> SALCEDO, Elkin. Estudio de sismicidad histórica en la región de Bucaramanga (Colombia). Rev Acad. Colomb. Cienc. 1999.

reconocen que la ciudad se encuentra vulnerable ante un fuerte sismo, debido a las condiciones predominantes en la región, lo que hace que el riesgo este siempre latente para la vida humana y la infraestructura.

Actualmente en el plan local de emergencias en la ciudad de Bucaramanga no se tiene un total desarrollo y conocimiento de las rutas y vehículos a utilizar para la recolección de las personas afectadas y la ubicación en sus respectivos albergues y centros de salud.

Por esta razón se hace necesario contar con un plan local de emergencias completo en donde se incluyan todas las etapas de la gestión de desastres y que permita dar una respuesta adecuada y eficaz al momento que se presente un desastre por sismos en la ciudad, requiriendo de la localización de puntos de encuentro y del diseño de rutas de transporte enfocada a salvaguardar las vidas humanas y minimizar el impacto socioeconómico y ambiental.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un algoritmo memético para el problema de localización y ruteo con ventanas de tiempo para la atención de desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga.

### **5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Revisar la literatura sobre ventanas de tiempo en problemas de logística humanitaria.
- Revisar en la literatura los enfoques evolutivos usados para la solución del problema de localización-ruteo (LRP).
- Construir la red de distribución del LRP con ventanas de tiempo (LRPTW) para el transporte de afectados en la fase de post-desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga.
- Construir un algoritmo memético para la solución de LRPTW.
- Implementar y validar el algoritmo diseñado por medio de herramientas informáticas.

## 6. MARCO TEÓRICO

### 6.1 LOGISTICA HUMANITARIA

Las organizaciones humanitarias, como el Programa Mundial de Alimentos (PMA) y Médicos Sin Fronteras (MSF) coinciden en que la logística humanitaria es el proceso de planificación, ejecución y control eficiente y efectivo, del flujo y almacenamiento de recursos (en estos también se encuentra la información) desde el punto de origen hasta los puntos de destino para satisfacer las necesidades urgentes de las personas afectadas en el marco de condiciones de emergencia.<sup>47</sup>

La logística humanitaria se diferencia de las operaciones de logística en las cadenas de suministro comerciales debido a las incertidumbres en la selección de ruta, el cambio de capacidad de la instalación, el cambio de la demanda, los problemas de seguridad, rutas no utilizadas y otros desafíos, como los sistemas interrumpen las comunicaciones, la disponibilidad limitada de recursos, y la necesidad de una eficiente y oportuna entrega.<sup>48</sup>

El campo de la logística humanitaria está ganando más interés y se ha visto un aumento significativo en la investigación en los últimos años. Las cadenas de suministro de respuesta para causas humanitarias son sin duda entre las cadenas de suministro, las más dinámicas y complejas del mundo.

Los modelos de toma de decisión pueden ayudar a las organizaciones humanitarias a refinar su estrategia para la planificación, la gestión de sus operaciones para el posicionamiento previo, el almacenamiento y la distribución, y sostener la ayuda durante y después de una crisis.<sup>49</sup>

---

<sup>47</sup> APTE, Aruna., Op. cit.,p. 1-100.

<sup>48</sup> SAFEER, M. Op cit. p.2248—2258.

<sup>49</sup> APTE, Aruna. Op. cit.. p. 1-100.

**6.1.1 Desastres.** La Organización Mundial de la Salud (OMS) define un "desastre" como cualquier evento que causa daño, destrucción, alteración ecológica, pérdida de la vida humana, sufrimiento humano, deterioro de los servicios sanitarios y de salud en una escala suficiente para justificar una respuesta extraordinaria desde fuera de la comunidad o área afectada.<sup>50</sup>

Un desastre es un evento, generalmente repentino e imprevisto, que ocasiona daños, pérdidas y paralización temporal de actividades en cierta área y afecta a una parte importante de la población. De acuerdo con el fenómeno que los originan, los desastres pueden clasificarse en dos grandes grupos: los que son provocados por fenómenos naturales y los que se derivan de actividades humanas. Los principales efectos primarios de los desastres son: la pérdida de vidas y lesiones en la población, la pérdida de bienes, el daño e interrupción de los servicios básicos, los daños en la infraestructura, la desorganización social y física de la comunidad, y las alteraciones orgánicas y conductuales de las personas.<sup>51</sup>

Los desastres naturales son el resultado de variables meteorológicas, geológicas o biológicas que ocurren de forma independiente al accionar humano (aunque algunas condiciones pueden verse exacerbadas por el impacto de la civilización en el ecosistema). Algunos desastres naturales son cíclicos, siguiendo un patrón estacional o geológico que ha sido documentado a través de la historia. Otros eventos, aunque son el resultado de las fuerzas naturales, son tan infrecuentes que su ocurrencia es interpretada como "rareza" de la naturaleza.

Los desastres crean una demanda masiva de las ayudas de socorro que incluyen alimentos, medicinas, refugio, agua y otros recursos. Se requieren operaciones de emergencia eficientes para aumentar la oferta de las ayudas de socorro. La gestión de las operaciones de logística humanitaria de emergencia es más compleja debido a los riesgos e incertidumbres que acompañan a cualquier

---

<sup>50</sup> SAFEER, M, et al., Op. Cit., p.2248—2258.

<sup>51</sup> CEPAL. El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: documento metodológico básico para estudios nacionales de caso. 2005. p. 6-26.

desastre. Esto plantea dificultades en las fases de planificación y mitigación en el caso de que se espere un desastre. En la fase de respuesta, los daños en el medio de transporte tales como carreteras y puentes, agravados por la incertidumbre de la demanda, la oferta y las condiciones ambientales complican aún más las operaciones humanitarias. Los desastres ponen a prueba la capacidad de las diferentes operaciones de emergencia en trabajar juntos para ofrecer la mejor ayuda de emergencia sea posible. Modelado, simulación y optimización son las principales herramientas para abordar y superar estos desafíos.<sup>52</sup>

Ante los desastres naturales, una ciudad bien administrada puede ser uno de los lugares más seguros del mundo. También puede constituir el lugar más idóneo para criar a los hijos, educarlos, tener acceso a la atención de salud y encontrar un empleo. La esperanza de vida es allí más elevada. La reducción del riesgo de desastres no es una actividad única si no un proceso continuo.<sup>53</sup>

Colombia enfrenta grandes retos ya que sus condiciones socio – económicas, aunadas a la propensión del país a la ocurrencia de fenómenos naturales, tales como sismos, inundaciones y deslizamientos, entre otros, exacerbados por las acciones humanas y las condiciones variantes del clima, confirman un proceso continuo de construcción y acumulación de riesgos. La materialización de estos riesgos en desastres, afectan el desarrollo del país e impiden y retrasan el logro de las metas de bienestar social trazadas por el Gobierno.<sup>54</sup>

---

<sup>52</sup> SAFEER, M, et al. Op cit..2248—2258.

<sup>53</sup> Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja. Informe Mundial sobre Desastres 2010. p. 1-10.

<sup>54</sup> BANCO MUNDIAL. Op cit. p. 63-69.

**6.1.1.1 Gestión de desastres.** La gestión de desastres es un conjunto de procesos diseñados para ser implementado antes, durante y después de desastres para prevenir o mitigar sus efectos. En general, se lleva en un sistema de ciclo que consiste en varias etapas principales. Entes gubernamentales y organizaciones están implicados en la gestión de desastres. El éxito de estos sistemas depende en gran medida de la cooperación y la coordinación de las organizaciones que participan en las operaciones de socorro eficaz y eficiente.<sup>55</sup> A fin de reducir las vulnerabilidades físicas, sociales, económicas y ambientales y disminuir el impacto de los eventos naturales extremos, se requiere de un marco estratégico para enfrentar los desastres naturales. Este marco estratégico debe tener en cuenta e incorporar las variables ambientales en las diferentes fases del ciclo de gestión de desastres (antes y después del desastre). La ausencia de normas y regulaciones para ordenar el establecimiento de actividades humanas en zonas de alto riesgo, combinada con el deterioro progresivo del medio ambiente por la acción del hombre, da lugar a situaciones que contribuyen a un incremento en el impacto de los desastres naturales.

En Colombia, la Ley 1523 de 2012, “se adopta la política Nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres SNGRD, donde se orienta a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible”. En donde se describe la gestión de desastres como el proceso social de planeación, ejecución, y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento y promoción de una mayor conciencia del

---

<sup>55</sup> MANOPINIWES, Wapee y IROHARA, Takashi. A Review of Relief Supply Chain Optimization. En: Sophia University. Japan.2014. Vol. 13, No. 1. p. 1-14.

mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones, así como para la posterior recuperación, entiéndase: rehabilitación y reconstrucción. Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la el bienestar y calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible.<sup>56</sup>

**6.1.1.2 Fases.** Las fases se describen en la figura 1 y en la tabla 1.

**Figura 1. Fases de la gestión de desastres.**



<sup>56</sup> CONGRESO DE COLOMBIA. Gestión del riesgo, responsabilidad, principios, definiciones y Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. 2012. LEY No.1523. Capítulo 1. [En línea] Disponible en:[<http://www.ifrc.org/docs/idrl/1057ES.pdf>].

Tabla 1. Fases de la gestión de desastres.

	DESCRIPCIÓN	FASE
ANTES DEL DESATRE	<p><b>PLANIFICACIÓN:</b> Se aprecian los valores de riesgo del territorio y se evalúa el nivel de preparación de la población ante las amenazas. Se educa a la población, se adiestran a los recursos humanos necesarios, se realizan inventarios y se acopian los recursos para su movilización rápida. Es el período más importante del proceso de planificación, el más largo y de mayores posibilidades para cumplir medidas de prevención, mitigación y preparación contra emergencia y desastre, según el fenómeno que se esté analizando. Es también la fase de reducción de riesgo previo al desastre.</p>	<p><b>PREVENCIÓN:</b> Conjunto de acciones cuyo objeto es impedir o evitar que sucesos naturales o generados por la actividad humana, causen desastres. Las medidas de prevención contra los efectos de los desastres deben considerarse como parte fundamental del proceso de desarrollo integral a escala territorial, y dependen en gran medida de la evaluación de riesgos.</p>
		<p><b>MITIGACIÓN:</b> Conjunto de actividades que se realizan antes de un desastre, para reducir o atenuar el efecto de su impacto en la población, la economía y el medio ambiente. Se hace con el fin de modificar las características de un fenómeno, con el objetivo de reducir el impacto de la amenaza.</p>
		<p><b>PREPARACIÓN:</b> Conjunto de medidas cuyo objetivo es organizar y estructurar la respuesta de la comunidad a las condiciones adversas; educar, capacitar y adiestrar a la población con el objeto de facilitar las acciones para un efectivo y oportuno aviso, control, evacuación y conducta que permitan una restauración lo más pronto posible, tanto física como social. Esta etapa de preparación exige una cuidadosa planificación de sus acciones.</p>
DURANTE	<p><b>RESPUESTA:</b> Esta fase comprende la respuesta planificada y oportuna, se lleva a cabo inmediatamente después de ocurrido un evento adverso y requiere la realización de un conjunto de acciones integradas, multifactoriales y multisectoriales, para salvar vidas, reducir sufrimientos, pérdidas económicas y daños al medio ambiente. La emergencia comienza inmediatamente después del impacto y es cuando se brinda apoyo y asistencia a las víctimas, y algunas de las operaciones que se requieren son de: Búsqueda, rescate y primeros auxilios, asistencia médica de urgencia, evacuación de heridos y lesionados y alojamiento temporal de damnificados (evacuación del personal de áreas vulnerables).</p>	
DESPUÉS DEL DESATRE	<p><b>RECUPERACIÓN:</b> Esta es la fase posterior al desastre, corresponde al proceso de recuperación y en la cual se realizan actividades para restablecer las consecuencias resultantes a corto, mediano o a largo plazo.</p>	<p><b>REHABILITACIÓN:</b> En ella se va dando prioridad a la prestación de servicios habituales indispensables en instalaciones provisionales, abastecimiento de agua mediante camiones-cisternas y servicios médicos en las instalaciones provisionales.</p>
		<p><b>RECONSTRUCCIÓN:</b> Proceso de reparación del daño físico, social y económico, a mediano y largo plazo, a un nivel de desarrollo igual o superior al existente antes del desastre. Esta etapa es la que más recursos y esfuerzos exige y la que menos se presta para motivar a la solidaridad internacional.</p>

Para la fase de respuesta es de suma importancia tener unos puntos de encuentro ya establecidos para que las personas después del desastre sepan a donde dirigirse para estar fuera de peligro, ser recogidos y trasladados a los albergues o lugares para la atención médica.

Albergues: La Federación Internacional de la Cruz Roja y la Media Luna Roja define Albergue como: “Lugar físico creado e identificado como un lugar seguro, que cuenta con todos los medios necesarios para hospedar por un periodo corto, mediano y largo plazo a un grupo de personas afectadas por los resultados del impacto de una amenaza , con las garantías esenciales para garantizar la dignidad humana, conservando la unidad familiar y la cultura de las personas afectadas así como su estabilidad física (mental) y psicológica. Promoviendo la organización comunitaria”.

Punto de Encuentro: Espacio de paso, que sirve para proporcionar techo, alimentación y abrigo a las víctimas de una emergencia o desastre, mientras la comunidad se traslada a un Alojamiento o Albergue Temporal.<sup>57</sup>

## **6.2 OPTIMIZACIÓN COMBINATORIA**

La optimización combinatoria es una rama de la optimización en matemáticas aplicadas y la ciencia de la computación, la cual estudia los problemas que se caracterizan por presentar una cantidad finita de soluciones factibles y trabajar con variables discretas.

---

<sup>57</sup> Sociedad Nacional de La Cruz Roja Colombiana. Manual Nacional para el manejo de Albergues Temporales. 2008. p. 17-30.

**6.2.1 Problemas de optimización combinatoria.** Los problemas de optimización combinatoria son aquellos que buscan una solución “óptima” o la que encuentra el valor máximo o mínimo dentro de un espacio finito, o infinito, numerable de soluciones factibles definido por la función objetivo.

Un problema de optimización combinatoria puede ser definido por<sup>58</sup>:

Un conjunto de variables  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ ;

Un dominio de las variables  $D_1, \dots, D_n$ ;

Restricción entre variables;

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

El conjunto de todas las posibles asignaciones factibles es:

$$S = \{s = (X_1, V_1), \dots, (X_n, V_n)\}$$

Donde  $X_1 \in D_1, s$  *satisface todas las restricciones*

Así 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.

Los problemas genéricos de optimización combinatoria requieren encontrar una solución sobre un conjunto finito de soluciones<sup>59</sup>. Por ende las variables a usar han de ser de carácter discreto, restringiendo su dominio a una serie finita de valores. Si agrupamos las variables en conjuntos que representan grafos u objetos, lo ideal es ubicar dichas variables en determinadas posiciones, la técnica a usar es de carácter combinatorio.

---

<sup>58</sup> BLUM, Christian y ROLI, Andrea. Metaheuristic in combinatorial Optimization: Overview and conceptual comparison. En: ACM Computing Surveys (CSUR). 2008. Vol. 35, no. 3, pag. 268.

<sup>59</sup> MAREK L. A note on robustness tolerances for combinatorial optimization problems. Information Processing Letters. Vol. 110. 2010. p.725-729.

Los problemas de rutas o redes de transporte se pueden presentar por grafos. Los vértices son los lugares que se deben visitar o las ciudades a las que hay que transportar ciertos bienes o servicios. Los arcos son las calles, carreteras, oleoductos, cables de transmisión de mensajes, etc., que sirven como vías de comunicación.

**6.2.2 Complejidad computacional.** Un problema desde el punto de vista computacional está conformado por “un conjunto de datos de entrada, un conjunto de datos de salida y una función que asigna a cada dato del problema, una salida correcta del mismo<sup>60</sup>. Los valores particulares que toman los datos de entrada (parámetros) son definidos como instancias del problema. Este puede ser resuelto mediante la implementación de un algoritmo, que es una secuencia de pasos definidos, que transforman los datos de entrada en datos de salida.

El término complejidad computacional indica la eficiencia del algoritmo en la solución del problema. Esta eficiencia suele evaluarse mediante el tiempo que tarda el algoritmo en encontrar la solución o en ofrecer una salida y/o mediante el espacio computacional utilizado por el mismo, donde el espacio es básicamente el almacenamiento de datos en la computadora. A partir de esta idea, matemáticamente los problemas pueden ser categorizados por el grado de dificultad de acuerdo con la complejidad computacional del algoritmo que permite establecer su resolución. De esta manera los problemas pueden ser clasificados en problemas tratables y no tratables.

#### Problemas P:

Un problema es tratable cuando puede ser resuelto en tiempo polinómico (clase P), donde el tiempo de ejecución crece de forma polinomial con el tamaño de los

---

<sup>60</sup> PEREZ, Mario y SANCHO, Fernando. Maquinas moleculares basadas en ADN. En: Universidad de Sevilla. España. 2003. Citado en: <http://goo.gl/TNprv>.

datos de entrada. Todos los problemas en esta clase tienen una solución cuyo requisito de tiempo es un polinomio en el tamaño de entrada  $n^{61}$ .

#### Problemas NP:

Los problemas NP (nondeterministic polynomial time) son problemas no tratables, es decir que no pueden ser resueltos en tiempo polinómico, por consiguiente se tratan de resolver mediante algoritmos no deterministas cuya solución deseable sea de complejidad polinomial.

#### Problemas NP-completo:

Se define un problema  $P^*$  como un problema NP. Entonces  $P^*$  es NP-Completo si su tiempo de cómputo es reducible a un tiempo polinomial.

#### Problemas NP-hard:

Los problemas NP-hard son similares a los problemas NP, pero son muy difíciles de resolver ya que requieren tiempo exponencial para ser solucionados, es decir que no existe un algoritmo polinómico que permita verificar su solución.

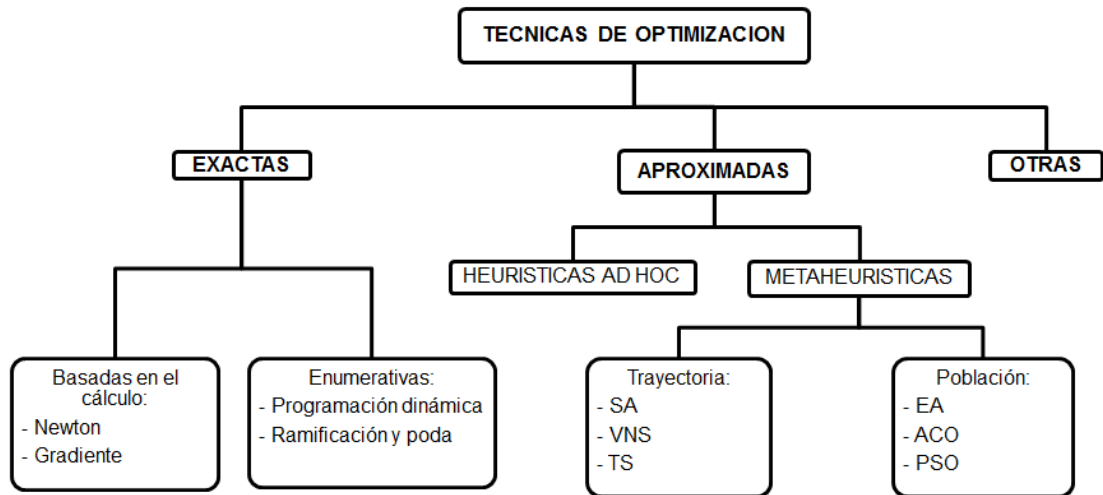
### **6.3 MÉTODOS DE SOLUCIÓN**

Los problemas de optimización combinatoria han presentado diversas aplicaciones prácticas, como en situaciones del mundo real, haciendo que sean temas atractivos para investigación y extensión. Múltiples métodos han sido creados para intentar dar solución a estos problemas. La figura 2 muestra la clasificación de las técnicas de optimización, las cuales pueden clasificarse generalmente en métodos exactos y métodos aproximados.

---

<sup>61</sup> HAMALAINEN, Wilhemina. Class NP, NP-complete, and NP-hard problems. [en línea]. (2006). [Consultado 4 May. 2016]. Disponible en: [<http://cs.joensuu.fi/pages/whamalai/daa/npsession.pdf>].

Figura 2. Clasificación de las técnicas de optimización.



**6.3.1 Métodos exactos.** Son aquellos que garantizan una solución óptima de los resultados, pero no tienen tiempo de complejidad polinómica para resolver los problemas de tipo NP o NP-hard, ya que éste crece exponencialmente con el tamaño del problema. A esta categoría pertenecen el método simplex y el algoritmo de ramificación y acotamiento.

**6.3.2 Métodos aproximados.** Ofrece la posibilidad de encontrar soluciones en tiempos razonables para los problemas de tipo NP-Hard, y son consideradas buenas soluciones de alta calidad. Este tipo de métodos se clasifican en: heurísticas y metaheurísticas.

**6.3.2.1 Heurísticas.** Se puede definir como “un procedimiento que busca buenas soluciones a un costo computacional razonable, aunque no se garantice su optimalidad, e incluso, en algunos casos no se llegue a establecer que tan cerca este de la optimalidad y factibilidad”<sup>62</sup>.

**6.3.2.2 Metaheurísticas.** Es un proceso de generación que guía una heurística subordinada que combina diferentes conceptos para explorar y explotar la búsqueda con la finalidad de encontrar buenas soluciones cercanas al óptimo. La mayoría de metaheurísticas están dirigidas a los problemas de optimización combinatoria. Este tipo de métodos se basan en fenómenos naturales como el comportamiento de las abejas, de las hormigas o de las partículas con el fin de evitar la principal desventaja de las heurísticas, caer en óptimos locales. Las metaheurísticas se clasifican en algoritmos basados en trayectoria y en algoritmos basados en población.

- Metaheurísticas basadas en trayectoria: La principal característica de estos métodos es que parten de una solución y, mediante la exploración del vecindario, van actualizando la solución actual, formando una trayectoria. La mayoría de estos algoritmos surgen como extensiones de los métodos de búsqueda local simples a los que se les añade algún mecanismo para escapar de los mínimos locales. Esto implica la necesidad de una condición de parada más elaborada que la de encontrar un mínimo local. Entre las metaheurísticas basadas en trayectoria se encuentran: Enfriamiento simulado o Simulated Annealing (SA), Búsqueda tabú o Tabú Search (TS), Procedimiento de búsqueda miope aleatorizado (GRASP), Búsqueda con vecindario variable (VNS) y Búsqueda local iterada o Iterated Local Search (ILS).

---

<sup>62</sup> REEVES, C. Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems. 1995. Mc-Greenhill. Citado por: NASSER A, El-Sherbeny. Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods. En: Journal of King Saud University. 2010. Vol.22. p.126 -127.

- Metaheurísticas basadas en población: Los métodos basados en población se caracterizan por trabajar con un conjunto de soluciones (denominado población) en cada iteración. Algunas metaheurísticas basadas en población son: Algoritmos evolutivos o Evolutionary Algorithms (EA), Algoritmos de estimación de la distribución (EDA), Búsqueda dispersa o Scatter Search (SS), Optimización basada en colonia de hormigas (ACO) y Optimización basada en cúmulos de partículas (PSO)

**6.3.2.3 Métodos híbridos.** Los algoritmos híbridos metaheurísticos se basan en la combinación de varias metaheurísticas con el fin de aprovechar las fortalezas y eliminar las limitaciones individuales, generando métodos de búsqueda más potentes y flexibles. Se pueden distinguir tres formas principales de hibridación<sup>63</sup>, pero la mayoría de los algoritmos híbridos pertenecen a la categoría de hibridación de componente de intercambio, en el que varios componentes y características de solución están compartidos entre dos o más métodos heurísticos y metaheurísticos.

---

<sup>63</sup> BLUM, Christian y ROLI, Andrea. Metaheuristic in combinatorial Optimization: Overview and conceptual comparison. En: ACM Computing Surveys (CSUR). 2008. Vol. 35, no. 3, pag. 268.

**6.3.3 Computación evolutiva.** El principio de Charles Darwin “Supervivencia del más apto” es usado como punto referencia para introducir el concepto de Computación evolutiva (EC). La evolución es un proceso de optimización en el cual el objetivo es mejorar la capacidad de un organismo o sistema para sobrevivir en entornos cambiantes, dinámicos y competitivos. En el área específica de la evolución biológica han sido aceptadas las teorías Darwinianas y Lamarckiana; la primera tiene su enfoque en la supervivencia y reproducción de los individuos con las mejores características para que sean transmitidas a su descendencia, la segunda teoría establece su idea principal en la adaptación de los individuos a lo largo de su vida y la conservación de aquellos rasgos que sean importantes para ellos.

Estos principios los resumen las técnicas de computación evolutiva en algoritmos que pueden ser usados para buscar soluciones óptimas a un problema. En estos algoritmos de búsqueda se tiene cierta cantidad de posibles soluciones en el problema y el objetivo es encontrar la mejor solución en una magnitud de tiempo determinado.

En la computación evolutiva hay diversos paradigmas históricos que han servido como base para varias actividades realizadas en este campo, y son las diversas formas en las cuales son implementados los componentes de los EA. Estos paradigmas son:

**6.3.3.1 Programación evolutiva.** La programación evolutiva (EP) propuesta en la década de los 60 por Lawrence Fogel<sup>64</sup>, surge como un enfoque alternativo a la inteligencia artificial. Las representaciones usadas en la programación evolutiva se realizan mediante números reales (cualquier estructura de datos), y emplea los mecanismos de mutación y selección. El procedimiento es muy similar a las estrategias evolutivas con la diferencia de que no emplea la recombinación.

---

<sup>64</sup> FOGEL, Lawrence. Autonomous Automata. En: Industrial Research. 1962. Vol.4, Ed. 2. p.14-19.

**6.3.3.2 Algoritmos genéticos.** Modelan el proceso de evolución como una sucesión de frecuentes cambios en los genes, con soluciones análogas a cromosomas. Trabajan con una población de cadenas binarias para la representación del problema, y el espacio de soluciones posibles es explorado aplicando transformaciones a éstas soluciones candidatas tal y como se observa en los organismos vivientes: cruce, inversión y mutación.

Los algoritmos genéticos difieren de las estrategias de búsqueda convencionales en que estos (los AGs) trabajan sobre un conjunto de potenciales soluciones, llamado población. Esta población está compuesta de una serie de soluciones llamadas individuos y un individuo está conformado por una serie de posiciones que representan cada una de las variables involucradas en los procesos de optimización y que son llamados cromosomas. Estos cromosomas están compuestos por una cadena de símbolos que en muchos casos esta presentada en números binarios.

Para la obtención de las próximas generaciones se crean nuevos individuos, llamados hijos, utilizando dos estrategias de evolución básicas como son el operador de cruce y el de mutación (empleadas generalmente de forma aleatoria). Una nueva generación es obtenida mediante la utilización del operador de selección, que básicamente se realiza sobre los valores de aptitud de los individuos. El operador de selección debe mantener constante el número de individuos de la población, y a través de las generaciones el individuo con mayor valor de aptitud tiene mayores posibilidades de ser seleccionado en la siguiente generación.

Luego de la selección de las mejores y las candidatas prometedoras se les permite reproducirse, se someten de nuevo a la descendencia a una ronda de evaluación de aptitud, luego se eliminan a las que han empeorado o no han mejorado con los cambios en su código y así se repite el proceso.

Tras varias iteraciones el algoritmo converge al individuo con mejor valor de aptitud, el cual representará el óptimo o subóptimo del problema.

Operadores evolutivos:

### Selección

- Selección por rueda de ruleta: una forma de selección proporcional a la aptitud en la que la probabilidad de que un individuo sea seleccionado es proporcional a la diferencia entre su aptitud y la de sus competidores.
- Selección escalada: útil para seleccionar más tarde, cuando todos los individuos tengan una aptitud relativamente alta y sólo les distinguen pequeñas diferencias en la aptitud.
- Selección por torneo: se eligen subgrupos de individuos de la población, y los miembros de cada subgrupo compiten entre ellos.
- Selección por rango: a cada individuo de la población se le asigna un rango numérico basado en su aptitud, y la selección se basa en este ranking, en lugar de las diferencias absolutas en aptitud

### Cruce y mutación

- Cruce: Implica elegir a dos individuos para que intercambien segmentos de su código, produciendo una “descendencia” artificial cuyos individuos son combinaciones de sus padres.
- Mutación: Al igual que una mutación en los seres vivos cambia un gen por otro, una mutación en un algoritmo genético también causa pequeñas alteraciones en puntos concretos del código de un individuo.

## 6.4 ALGORITMO MEMÉTICO

Los algoritmos meméticos (MA) son técnicas de optimización que combinan sinérgicamente conceptos tomados de otras metaheurísticas, tales como la búsqueda basada en poblaciones (como los algoritmos evolutivos), y la mejora local (como en las técnicas de seguimiento de gradiente), con el fin de aprovechar las ventajas que proporcionan de acuerdo a estrategias implícitas en el enfoque de cada una de ellas.

Este concepto fue introducido por Moscato y Norman basado en la idea expresada por Dawkins respecto al concepto de los memes como un análogo al tema genético desde la perspectiva de evolución cultural. Dado que el algoritmo memético combina métodos de algoritmos evolutivos (EA) en su desarrollo, este adquiere algunos aspectos y características provenientes de los mismos, como la sintaxis, por ejemplo; por lo tanto, el procedimiento es similar al que se lleva a cabo en los EAs para la solución de problemas, esto fundamentalmente debido a la naturaleza poblacional de los MA.

Un MA mantiene en todo momento una población de diversas soluciones al problema considerado. Cada una de estas soluciones se conoce como agentes; esta denominación es una extensión del término comúnmente empleado en el contexto de los EAs, y permite capturar elementos distintivos de los MA, por ejemplo, un agente puede contener más de una solución al problema considerado<sup>65</sup>. Estos agentes se interrelacionan entre sí en un marco de competición y de cooperación, de manera muy semejante a lo que ocurre en la Naturaleza entre los individuos de una misma especie. Cuando consideramos la población de agentes en su conjunto, esta interacción puede ser estructurada en una sucesión de grandes pasos temporales denominados generaciones.

---

<sup>65</sup> BERRETTA R, et al. Enhancing the performance of memetic algorithms by using a matching-based recombination algorithm: Results on the number partitioning problem. 2003. Kluwer Academic Publishers, Boston MA. p.65–90.

Cada generación consiste en la actualización de la población de agentes, usando para tal fin una nueva población obtenida mediante la recombinación de las características de algunos agentes seleccionados. Más concretamente, la selección se encarga de elegir una muestra de los mejores agentes contenidos en la población actual. Esto se realiza mediante el empleo de una función guía  $F_g$  encargada de cuantificar cuán bueno es cada uno de los agentes en la resolución del problema abordado. Por otra parte, el reemplazo o actualización incide en el aspecto competitivo, encargándose de la importante tarea de limitar el tamaño de la población, esto es, eliminar algunos agentes para permitir la entrada de otros nuevos y así enfocar la tarea de búsqueda.

La creación de nuevos agentes es responsabilidad de la fase de reproducción, que tiene lugar mediante la aplicación de cierto número de operadores reproductivos. Es posible emplear un número variado de operadores, no obstante, lo más típico es emplear únicamente dos operadores: recombinación y mutación. El operador de recombinación es el responsable de llevar a cabo los procesos de cooperación entre agentes, que tiene lugar mediante la construcción de nuevos agentes empleando información extraída del grupo de agentes recombinados o alguna información externa. El operador mutación es el responsable de la inclusión de la información externa que no está contenida en ninguno de los agentes involucrados, básicamente se genera un nuevo agente mediante la modificación parcial de un agente existente.

Un meta-operador, u optimizador local, se basa en la aplicación iterativa de un operador de mutación arbitrario sobre un agente, mientras se conservan los cambios que llevan a una mejora en la bondad del agente. El empleo de estos metaoperadores es uno de los rasgos más distintivos de los MAs, y pueden emplearse en diferentes fases de la reproducción. Por ejemplo, pueden usarse tras la aplicación de operadores simples, aplicarse solo a un subconjunto de agentes o ser aplicado al final del ciclo reproductivo.

La generación de la población inicial puede llevarse a cabo de diferentes formas, por ejemplo, pueden crearse agentes al azar, emplear las soluciones proporcionadas por heurísticas existentes, o utilizar optimizadores locales que podrán generar posibilidades más satisfactorias.

La función para la reiniciación de la población es otro de los componentes fundamentales del MA, ya que de él dependerá que se haga un uso apropiado de los recursos computacionales del sistema, o por el contrario estos se malgasten en la explotación de una población de agentes que haya alcanzado un estado degenerado, es decir convergencia del MA. Una vez se ha detectado la convergencia del MA, la población de agentes se reinicia, conservando una porción de la misma, y generando nuevos agentes para completarla.

**Figura 3. Algoritmo memético básico.**

```

Algoritmo Memético
ENTRADA: una instancia  $I$  de un problema  $P$ .
SALIDA: una solución  $sol$ .

// generar población inicial
1: para  $j \leftarrow 1:popsiz$  hacer
2:   sea  $ind \leftarrow$  GenerarSoluciónHeuristica ( $I$ )
3:   sea  $pop[j] \leftarrow$  MejoraLocal ( $ind, I$ )
4: finpara
5: repetir // bucle generacional
   // Selección
6:   sea  $criadores \leftarrow$  SeleccionarDePoblación ( $pop$ )
   // Reproducción segmentada
7:   sea  $auxpop[0] \leftarrow pop$ 
8:   para  $j \leftarrow 1:\#op$  hacer
9:     sea  $auxpop[j] \leftarrow$  AplicarOperador ( $op[j], auxpop[j - 1], I$ )
10:  finpara
11:  sea  $newpop \leftarrow auxpop[\#op]$ 
   // Reemplazo
12:  sea  $pop \leftarrow$  ActualizarPoblación ( $pop, newpop$ )
   // Comprobar convergencia
13:  si Convergencia ( $pop$ ) entonces
14:    sea  $pop \leftarrow$  RefrescarPoblación ( $pop, I$ )
15:  fin
16: hasta CriterioTerminación ( $pop, I$ )
17: devolver Mejor ( $pop, I$ )

```

En la práctica, la situación más típica es la de utilizar simplemente tres operadores: recombinación, mutación y mejora local. Es importante apreciar que estos operadores reciben no solo soluciones sobre las que actúan, sino también la instancia  $I$  que se desea resolver. Con esto se ilustra el hecho de que los operadores de un MA son conscientes del problema, y basan su funcionamiento en el conocimiento que incorporan sobre el mismo (a diferencia de los modelos clásicos de EA). La figura 3 muestra el esquema general de un MA, donde se aprecia el uso de los operadores y conservación de la población a través del algoritmo.

Uno de los campos más fructíferos para los MAs es el ámbito de la optimización combinatoria, para el que estas técnicas cuentan con cientos de aplicaciones. Eso no es sorprendente si tenemos en consideración que existen miles de problemas de optimización pertenecientes a la clase NP, donde los MA se han mostrado de gran valor. De entre todas éstas pueden destacarse las siguientes: problemas de particionado en grafos, partición de números, conjunto independiente de cardinalidad máxima, empaquetado, coloreado de grafos, recubrimiento de conjuntos, planificación de tareas en una máquina con tiempos de “set-up” y fechas de entrega, planificación de tareas en varias máquinas, problemas de asignación generalizados, problemas de mochila multidimensional, programación entera no-lineal, asignación cuadrática, particionado de conjuntos, y muy especialmente el problema del viajante de comercio<sup>66</sup>.

## **6.5 PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN-RUTEO**

El concepto de LRP se introdujo a principios de los 60s por Boventer (1961), posteriormente Maranzana (1964), Webb (1968), Lawrence y Pengilly (1969) y

---

<sup>66</sup> COTTA, Carlos. Una visión general de los algoritmos meméticos. University of Málaga, Madrid, España. [En línea] Disponible en: [<http://www.lcc.uma.es/~ccottap/papers/memeticos.pdf>]

Christofides y Eilon (1969) trataron el tema. Estos primeros estudios no consideraban la complejidad del carácter combinado del LRP, solo hasta finales de los 70s y principios de los 80s se extendió como un problema combinado.<sup>67</sup>

El LRP estándar se define como el problema determinístico, estático, discreto, de un solo escalón, de un solo objetivo, donde cada cliente (vértice) debe ser visitado una sola vez exactamente para la entrega de un bien de una instalación, y donde las decisiones de inventario no son relevantes<sup>68</sup>.

De acuerdo con las especificaciones anteriores, se define el LRP estándar como un problema con las siguientes características principales:

- Todos los datos relevantes son deterministas, es decir, son totalmente conocidos de antemano.
- Hay un período de planificación, es decir, una situación en la planificación estática.
- El conjunto de posibles ubicaciones para las instalaciones es finito.
- Hay una sola función objetivo, escalar.
- Cada cliente tiene una demanda que debe ser satisfecha por una entrega de exactamente una de las posibles instalaciones; no se permiten las transferencias de carga en puntos intermedios.
- Cada cliente debe ser visitado una sola vez por un vehículo.
- No se aplican consideraciones de inventario, ni en las instalaciones ni a los clientes.

El objetivo es resolver un problema de ubicación de instalaciones (problema principal), pero para conseguir esto simultáneamente se debe resolver un problema de ruteo de vehículos (subproblema). Para ser clasificado como un LRP

---

<sup>67</sup> ZHANG, Qian, et al. Research on Location Routing Problem (LRP) Based on Chaos Search (CS) and Empirical Analysis. American Journal of Operations Research. 2013. Vol.3. No.1. p.1-6.

<sup>68</sup> DREXL, Michael and SCHNEIDER, Michael. A survey of variants and extensions of the location-routing problem. European Journal of Operational Research. 2014. Disponible en: ELSEVIER. p.1-26.

debe tener los dos problemas de localización (FLP, por sus siglas en ingles) y ruteo (VRP, por sus siglas en ingles), pero además deben estar inter-relacionados. Debe existir una planificación de viajes (existencia de múltiples paradas en la ruta, que ocurre cuando la demanda de los clientes son menores que la capacidad máxima del camión)<sup>69</sup>.

El FLP y el VRP pueden ser vistos como casos especiales del LRP; si lo que se busca es que todos los clientes estén directamente vinculados a una instalación (deposito), el LRP es un problema de localización estándar, mientras que si los lugares de depósito son fijos, el LRP se reduce a un VRP (Nagy & Salhi, 2007)<sup>70</sup>.

La principal diferencia entre el LRP y un problema de localización-asignación clásico es que una vez la instalación ha sido localizada, el LRP requiere una visita a los clientes a través de tours, mientras que el problema de localización básico asume que el cliente recibe la visita del vehículo directamente y luego el vehículo regresa a la instalación sin servir ningún otro cliente<sup>71</sup>. Por lo tanto, el problema de ubicación y asignación clásica ignora recorridos en la localización de las instalaciones y, posteriormente, puede conducir a un aumento de costos de distribución. En contraste con el problema de ubicación y asignación clásica, el LRP considera recorridos y luego busca la ubicación de la instalación y el diseño de la ruta óptima al mismo tiempo para que pueda interrelacionar estas dos decisiones.

Desde el punto de vista práctico LR hace parte de la gestión de la distribución, mientras desde el punto de vista matemático, se puede modelar como un problema de optimización combinatoria (NP-hard problem, cada uno NP-hard).

Aunque la mayoría de las aplicaciones del LRP se enfocan en la distribución de bienes de consumo y parcelas, también hay algunas aplicaciones en el área de la

---

<sup>69</sup> NAGY, Gábor and SALHI, Said. Op cit. p.649–672.

<sup>70</sup> NAGY, Gábor and SALHI, Said. Op cit. p.649–672.

<sup>71</sup> MIN, Hokey et al. Artificial intelligence in supply chain management: Theory and applications. International Journal of Logistics. 1998. Vol. 13. No.1. p.13-39.

salud, militar y de comunicaciones. Algunas de estas aplicaciones se resumen en la tabla 2.

**Tabla 2. Áreas de aplicación de problemas de localización-ruteo.**

<b>Autor</b>	<b>Área de aplicación</b>	<b>País/Región</b>
Watson et al. (1973)	Distribución de Comidas y Bebidas	Reino Unido
Bender and Strohmeier (1979)	Distribución de Bienes para el Consumidor	Australia
Or and Pierskalla (1979)	Ubicación de Bancos de Sangre	Estados Unidos
Jacobsen and Madsen (1980)	Distribución de Periódicos	Dinamarca
Nambair et al. (1989)	Ubicación de Plantas de Plásticos	Malasia
Perl and Daskin (1985)	Distribución de Bienes	Estados Unidos
Semet and Taillard (1993)	Distribución de Abarrotes	Suiza
Kulcar (1996)	Recolección de Desechos	Bélgica
Murty and Djang (1999)	Ubicación de Equipos Militares	Estados Unidos
Bruns et al. (2000)	Entrega de Paquetes	Suiza
Chan et al. (2001)	Evacuación Medica	Estados Unidos
Lin et al. (2002)	Entrega de Facturas	Hong Kong
Lee et al. (2003)	Diseño de Redes Ópticas	Corea
Wasner and Zäpfel (2004)	Entrega de Paquetes	Australia
Billionnet et al. (2005)	Diseño de redes de telecomunicaciones	Francia
Gunnarsson et al. (2006)	Industria de las compras	Europa

**Fuente. Hassanzadeh et al. (2009)**

**6.5.1 Clasificaciones del LRP.** Varios esquemas de clasificación están disponibles en la literatura para categorizar el LRP. Una clasificación del LRP con respecto a su perspectiva del problema se presenta en la tabla 3.

**Tabla 3. Clasificación del LRP.**

Nivel jerárquico	Una etapa Dos etapas
Naturaleza de la demanda	Determinística Estocástica
Número de instalaciones	Instalación única Instalación múltiple
Tamaño de la flota de vehículos	Un solo vehículo Múltiples vehículos
Capacidad de los vehículos	Sin restricciones de capacidad Con restricciones de capacidad (Capacitado)
Capacidad de las instalaciones	Sin restricciones de capacidad Con restricciones de capacidad (Capacitado)
Capa de instalación	Primaria Secundaria
Horizonte de planeación	Un solo periodo Múltiples periodos
Restricciones de tiempo	Tiempo no especificado sin un plazo Ventanas de tiempo suaves con plazos libres Ventanas de tiempo duras con plazos estrictos
Función objetivo	Único objetivo Múltiples objetivos
Tipo de datos del modelo	Hipotético Mundo real

**Fuente. Hassanzadeh et al. (2009)**

**6.5.2 Métodos de solución para el LRP.** El LRP por ser un problema de optimización combinatoria, puede ser resuelto mediante métodos exactos o métodos aproximados. Pero cabe resaltar la atención que han tenido los métodos híbridos, es decir, procedimientos de solución que combinan dos o más métodos para aprovechar las cualidades individuales de cada uno y obtener mejores soluciones.

Los métodos exactos proporcionan una mejor aproximación a los problemas, pero debido a la complejidad de la localización-ruteo, sólo pueden hacer frente a los casos relativamente pequeños. Instancias de localización-ruteo general con hasta 40 posibles ubicaciones de depósitos o 80 clientes se han resuelto de manera óptima<sup>72</sup>. Por otra parte, los métodos aproximados encuentran soluciones cercanas al óptimo en un tiempo computacional razonable, con instancias de gran tamaño con aproximaciones a problemas del mundo real.

El algoritmo propuesto para resolver el problema de localización-ruteo con ventanas de tiempo es un algoritmo memético (MA), el cual se basa en la población y puede verse como una variante de los algoritmos genéticos (GA), con la diferencia de que el MA trata de imitar la evolución cultural en vez de la evolución biológica como lo hacen los GAs<sup>73</sup>. Este tipo de algoritmo puede satisfacer las necesidades propias de un problema de logística humanitaria debido a la robustez generada por sus propiedades evolutivas y de búsqueda local como se ha evidenciado en investigaciones de modelado de optimización presentadas por Song et al.<sup>74</sup>, para un problema de evacuación, y Li Shouying y Zhou Huijuan (2014)<sup>75</sup>, para la búsqueda de víctimas en inundaciones.

---

<sup>72</sup> LAPORTE, Gilbert. The vehicle routing problem. An overview of exact and approximate algorithm. En: European Journal of Operational Research. 1992. vol. 59, p. 345.

<sup>73</sup> MATEOS, Alfonso. Algoritmos evolutivos y algoritmos genéticos. Trabajo para la Universidad Carlos III de Madrid. p.1-14.

<sup>74</sup> SONG, R., HE, S. y ZHANG, L. Op. Cit. p. 154-160.

<sup>75</sup> SHOUYING, Li and HUIJUAN, Zhou. Op. Cit. p.2080-208.

**6.5.3 LRP con Ventanas de tiempo.** El problema de localización y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo pertenece a la clase de problemas de optimización combinatoria NP-hard. Una ventana de tiempo es el período entre una hora de inicio y una hora de finalización en el que una ruta debería visitar una ubicación de red. En el caso de una ventana de tiempo dura, si un vehículo llega donde un cliente muy temprano, va a tener que esperar. Además, las fechas (horarios) de entrega no pueden ser violadas. Por el contrario, en ventanas de tiempo blandas, la restricción de ventana de tiempo puede ser violada a un costo definido<sup>76</sup>.

El problema de localización-ruteo de una sola etapa con ventanas de tiempo (SSLRPTW, por sus siglas en inglés)<sup>77</sup> se define en un grafo dirigido  $G = (V, A, C, T)$ . El conjunto de nodos  $V$  consiste en un subconjunto  $D$  de  $m$  sitios de depósitos potenciales y un subconjunto  $I = V \setminus D$  de  $n$  clientes.  $C$  y  $T$  son pesos correspondientes a los gastos de viaje  $C_{ij}$  y el tiempo de viaje  $T_{ij}$  (incluye tiempo de servicio  $S_i$  en el nodo  $i$ ), asociado con el conjunto de arcos  $A$  que une cualquiera de los dos nodos  $i$  y  $j$ . Cada sitio de depósito tiene una capacidad de  $Q_d$ , horario de apertura  $[Abierto_d, Cerrado_d]$ , y costo de apertura  $F_d$ . Además, cada cliente tiene una demanda  $q_i$  y tiene que ser atendido durante el intervalo de tiempo  $[a_i, b_i]$ . Para fines de servicio, una flota homogénea  $K$  de vehículos con capacidad  $C$  está disponible y cualquier subconjunto se puede colocar en cualquier sitio de depósito. La tarea consiste en determinar la ubicación de los depósitos abiertos, la asignación de los clientes a los depósitos abiertos, y las rutas de vehículos que atienden a los clientes con gastos mínimos de tal manera que las siguientes restricciones se mantienen:

- Cada cliente se asigna exactamente a un depósito abierto y es atendido por exactamente un vehículo durante su ventana de tiempo (un tiempo de espera  $W_i$  en el cliente  $i$  es permitido).

---

<sup>76</sup> SOLOMON, Marius and DESROSIERS, Jacques. Time window constrained Routing and Scheduling Problems. 2016.

<sup>77</sup> BOSE, Jurgen et al. Op cit. p. 100.

- Cada vehículo se utiliza una vez a lo sumo.
- Cada ruta de vehículo comienza y termina en el mismo depósito abierto durante las horas de apertura.
- La carga del vehículo no excede la capacidad del vehículo.
- La demanda total de los clientes asignados a un depósito abierto no excede la capacidad de depósito.

La función objetivo minimiza la suma de los costes de depósito y de transporte.

## 7. FORMULACIÓN DEL LRPTW

### 7.1 OBJETIVO DEL LRPTW

En esta formulación, el objetivo es minimizar el tiempo de evacuación total. El tiempo de evacuación total será el resultado de la ruta con mayor tiempo, es decir, para cada albergue se tienen  $n$  rutas lo cual la de mayor tiempo va a definir el tiempo de evacuación en dicho albergue, entonces teniendo todos los albergues con sus tiempos, al hacerse la evacuación de forma simultánea, se dice que la evacuación termina cuando llega el último bus de cualquier ruta a su albergue.

### 7.2 FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA

El modelo matemático a utilizar en el LRPTW para la atención de desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga está basado en el presentado por Zhu et al.<sup>78</sup> en 2014, con la modificación que éste está enfocado en la minimización de costos y el propuesto para este problema está enfocado en la minimización de tiempo total.

- Conjuntos:

$J =$  Conjunto de Puntos de Encuentro (PE).

$R =$  Conjunto de posibles albergues a abrir.

$S = J \cup R$

$V =$  Conjunto de vehículos .

$N =$  Número de PE.

- Parámetros y variables:

---

<sup>78</sup> ZHU, Lan, et al. Solving the LRPTW based on tabu search algorithm. En: Conference: 2014 International Conference of Logistics Engineering and Management, 2014, p. 2-4.

$Q_r =$  Capacidad del albergue.

$Q_k =$  Capacidad de los vehículos.

$q_j =$  Demanda del PE.

$u_{ik} =$  Variable auxiliar

$w_i =$  Tiempo en el que inicia el servicio para el PE  $i$ .

$[a_i, b_i] =$  Ventana de tiempo para el PE  $i$ .

$s_i =$  Duración del servicio para el PE  $i$ .

$t_{ij} =$  Tiempo en el que el vehículo va de  $i$  a  $j$ .

- Variables de decisión:

$x_{ijk} = 1$ , si el vehículo  $k$  va de  $i$  a  $j$ .

$Y_j = 1$ , si el albergue es abierto.

$Z_{rj} = 1$ , si el PE  $j$  es asignado al albergue  $r$ .

La formulación matemática se muestra a continuación:

Función objetivo:

$$\text{mín} \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} \sum_{k \in V} t_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k \in V} \sum_{i \in S} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in J; i \neq j; \quad (2)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in J} q_j x_{ijk} \leq Q_k \quad \forall k \in V; i \neq j; \quad (3)$$

$$\sum_{k \in V} \sum_{j \in J} Q_k x_{rjk} \leq Q_r \quad \forall r \in R; \quad (4)$$

$$\sum_{p \in S} x_{ipk} - \sum_{p \in S} x_{pjk} = 0 \quad \forall k \in V; i, j \in S; i \neq j; \quad (5)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{j \in J} x_{rjk} \leq 1 \quad \forall k \in V; \quad (6)$$

$$\sum_{l \in J} (x_{rlk} + x_{ljk}) \leq 1 + Z_{rj} \quad \forall r \in R; j \in S; k \in V; \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} x_{rjk} \leq Y_j \quad \forall k \in V; r \in R; \quad (8)$$

$$a_i \leq w_i \leq b_i \quad \forall i \in J; \quad (9)$$

$$w_j = \max(w_i + t_{ij} + s_i, a_j) \quad \forall i, j \in J; k \in V, i \neq j; \quad (10)$$

$$x_{ijk}(w_i + t_{ij} + s_i) - w_j \leq 0 \quad \forall i, j \in J; k \in V; i \neq j; \quad (11)$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{si el vehiculo } k \text{ va de } i \text{ a } j. \\ 0, & \text{de lo contrario.} \end{cases} \quad \forall i \in S; k \in V; i \neq j; \quad (12)$$

$$Y_j = \begin{cases} 1, & \text{si el albergue } r \text{ es abierto.} \\ 0, & \text{de lo contrario.} \end{cases} \quad \forall r \in R; \quad (13)$$

$$Z_{jr} = \begin{cases} 1, & \text{si el PE } j \text{ es asignado al albergue } r. \\ 0, & \text{de lo contrario.} \end{cases} \quad \forall r \in R; \quad (14)$$

$$u_{lk} - u_{jk} + Nx_{ljk} \leq N - 1 \quad \forall j, l \in J; k \in V; \quad (15)$$

$$u_{lk} \geq 0 \quad \forall l \in J; k \in V; \quad (16)$$

$$\sum_{i \in S} x_{iik} = 0 \quad \forall k \in V; \quad (17)$$

$$\sum_{k \in V} x_{r lk} + Z_r + Z_l \leq 2 \quad \forall r \in R; l \in R; \quad (18)$$

Adicional a estas restricciones propuestas por Zhu en su modelo, se agrega:

$$\sum_{j \in J} q_j \leq \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} Q_r Y_j \quad (19)$$

La ecuación (1), es la encargada de definir la función objetivo del problema, para este caso corresponde a minimizar el tiempo total de la evacuación. La ecuación (2) asegura que para cada PE sea asignada una ruta de vehículo. El conjunto de ecuaciones (3) y (4) hace referencia a las capacidades, la (3) indica que la demanda de los PE de una misma ruta no exceda la capacidad del vehículo de dicha ruta y por su parte la (4) indica que la capacidad de todas las rutas de un albergue no puede exceder la capacidad del albergue. La ecuación (5) hace referencia a la continuidad de la ruta.

En la ecuación (6) se indica que cada vehículo es asignado a una ruta del albergue y comienza en éste. En cuanto a la (7) tiene el encargo de asegurar que el albergue solo atiende a los PE asignados a éste. El conjunto de ecuaciones (9)-(11) asegura que las ventanas de tiempo no pueden ser violadas. Las variables binarias de decisión del problema están definidas en las restricciones (12)-(14). Las ecuaciones (15) (16) son las restricciones en donde se eliminan subtours y la variable auxiliar respectivamente. Por otra parte la (17) asegura que los albergues no pueden distribuirse por sí mismos y la ecuación (18) define que no haya rutas entre albergues. Por último la ecuación (19) asegura que la capacidad total de todos los albergues abiertos sea mayor o igual a la demanda del total de puntos de encuentro, esto con el fin de satisfacer la totalidad de la demanda.

El modelo propuesto tiene en cuenta los siguientes supuestos:

- ▣ Cada nodo cliente es servido por un solo vehículo y solo puede ser visitado una vez.
- ▣ La demanda total de los clientes asignados a un albergue no puede exceder su capacidad.
- ▣ Cada ruta inicia y termina en el mismo albergue.
- ▣ La demanda de un cliente es conocida.
- ▣ Una ruta está compuesta por segmentos de ruta. Cada nodo de cliente está conectado a su albergue por una ruta. La elección de la ruta es realizada por el algoritmo.
- ▣ Una ruta es servida por un solo vehículo.
- ▣ No se debe exceder la capacidad de los vehículos.
- ▣ Los vehículos son de capacidad homogénea.
- ▣ El conjunto de potenciales albergues es conocido.
- ▣ A los clientes se les asigna ventanas de tiempo.

## **8. DISEÑO DEL ALGORITMO MEMÉTICO PARA EL LRPTW**

El LRPTW corresponde al tipo NP-hard, por lo que se requiere desarrollar e implementar una metodología adecuada para su solución, en este caso se opta por el uso del algoritmo memético como principal herramienta metaheurística para establecer los albergues a ser abiertos y las rutas de los vehículos que van a recoger a los afectados en los puntos de encuentro asignados a éste, teniendo en cuenta como función objetivo la minimización del tiempo de evacuación, que se obtiene por la matriz de distancias (Anexo E), dada en unidades de tiempo, entre los puntos de encuentros (clientes) y los albergues (depósitos).

Los datos de la matriz de costos se extraen de la red de distribución creada en google maps por medio del programa GO.

### **8.1 REPRESENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN**

Los individuos de la población, también llamados agentes en el algoritmo memético, están formados por una parte binaria para la representación de albergues a habilitar, y una parte con valores enteros para la asignación de clientes y el vector de rutas.

Un agente consiste en tres partes: el estado del albergue, la asignación de puntos de encuentro a los albergues abiertos, y la ruta de los vehículos de cada albergue.

El estado de albergue es un vector de N albergues potenciales, donde cada gen en el vector representa el estado del albergue correspondiente, es decir, si está cerrado o abierto (figura 4). Si el albergue  $i$  está cerrado, su gen toma el valor de cero, de lo contrario, toma el valor de uno.

Figura 4. Representación del estado de los albergues.

		Depósitos (albergues)				
		1	2	3	...	n
Sln 1		1	0	1		0

La asignación de clientes es un vector de M puntos de encuentro establecidos, donde cada gen en el vector representa el número del albergue al que está asignado cada punto de encuentro (figura 5).

Figura 5. Representación asignación de PE.

		Clientes (puntos de encuentro)				
		1	2	3	...	m
Sln 1		3	1	3		1

La matriz de rutas (figura 6) es una configuración de N albergues por las rutas establecidas a cada albergue abierto, donde cada vector de ruta representa el origen (albergue), la secuencia de los clientes a visitar, y el destino (mismo albergue).

Figura 6. Representación rutas de cada albergue.

		Matriz rutas				
		1	2	3	...	n
Sln 1	1	0		0		
	2	2		1		
	3	m		3		
	...	0		0		
	m + 2k					

**8.1.1 Decodificación.** La decodificación de un cromosoma incluye:

- 1) La determinación de los depósitos abiertos utilizando la parte del cromosoma que tiene que ver con el estado de los depósitos.
- 2) La asignación de los clientes a los depósitos abiertos considerando el estado de los depósitos y de los clientes, la capacidad de los depósitos, y la demanda y ventanas de tiempo de los clientes
- 3) La obtención de las rutas, con menor tiempo de evacuación, para cada depósito abierto y sus clientes asignados. Además se debe hallar el valor de la función objetivo por cada solución.

Para el ejemplo se ha establecido que los albergues a abrir son el 1 y el 3. Al albergue 1 se asignan los clientes 2 y m, y al albergue 3 se asignan los clientes 1 y 3. Las rutas establecidas para el albergue 1 y 3 son [ 0 -> 2 -> m -> 0 ] y [ 0 -> 1 -> 3 -> 0 ] respectivamente. Por último, el valor de la función objetivo será el tiempo que dura el último vehículo en llegar al último albergue ya que los vehículos salen simultáneamente.

**8.1.2 Función objetivo (Fitness).** La función objetivo en el problema es la suma total de los tiempos de viaje, calculados de acuerdo a la matriz de costos, entre albergue y puntos de encuentro de la ruta más larga o más demorada; este es el tiempo de evacuación, que actuará también como la función de adaptación (fitness) en el algoritmo memético.

A cada individuo de la población se le hace corresponder el valor de la función objetivo, que será igual al tiempo de evacuación, el cual se calcula de acuerdo con los recorridos de todos los albergues y se escoge el tiempo más largo de una ruta, en el que el último vehículo llega con la última persona a ser evacuada a su albergue. En la figura 7 se puede ver en un ejemplo la codificación y el cálculo de la función objetivo.

Figura 7. Ejemplo del cálculo de la función objetivo del problema.

Depósitos (Albergues)				Clientes (Puntos de encuentro)									
1	2	3		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1	a	3	1	3	3	1	1	3	3	3	1
1	1	0	g	2	1	2	2	1	1	2	2	2	1

Matriz ruta (alb/clientes en ruta)				F.O RUTA (alb/ruta)		
A	1	2	3	1	2	3
	0		0	120,2		137,2
	6		1			
	0		3	116,9		142,3
	0		8			<b>147,3</b>
	2		0	117,6		147,3
	10		0			
	0		9			
	0		7			
	5		0			
	0		0			
			4			
			0			

**FUNCIÓN OBJETIVO**  
=tiempo de evacuación= tiempo que gaste el último vehículo para llegar al último albergue.

**MEJOR RESPUESTA =** El menor tiempo entre todos los tiempos de evacuación

**133,926**

(albergue 1 y 2, con la respectiva asignación de PE)

g	1	2	3	1	2	3
	0	0		120,2	119	
	6	1				
	0	3		116,9	126,6	
	0	8				
	2	0		117,6	133,9	
	10	0				
	0	9				
	0	7				
	5	0				
	0	0				
			4			
			0			

**8.1.3 Parámetros.** Los parámetros para la inicialización de la población del algoritmo diseñado se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4. Parámetros para la población inicial.**

<b>TAMAÑO DE LA POBLACIÓN</b>	En total una población inicial de 100 individuos creados con un enfoque de inicialización híbrido. Siempre verificando que cada individuo generado sea diferente de los demás y que cumpla las restricciones.
<b>TECNICAS DE INICIALIZACIÓN HÍBRIDA</b>	Aleatoria: Se generan números aleatorios de cada gen distribuidos uniformemente entre 0 y 1, para habilitar albergues. Vecino más cercano: Se asignan los puntos de encuentro a los albergues habilitados y se construyen las rutas.
<b>TASA DE MUTACIÓN</b>	La tasa de mutación designada para este tipo de problemas es de 100%. Se realizara mutación SWAP en el vector de rutas a cada agente de la piscina de soluciones. Se tendrá en cuenta si el resultado mejora o no al individuo.
<b>ITERACIONES LOCALES</b>	Se plantea un máximo total de 10 iteraciones locales (generales), debido a que no es necesario hacer mayor número de iteraciones ya que se obtienen buenas soluciones sin incurrir en mayor tiempo computacional.
<b>CORRIDAS POR INSTANCIA</b>	Se establece una sola corrida por instancia debido a la robustez del algoritmo memético diseñado.

## 8.2 PASOS LÓGICOS DEL PROCESO ALGORÍTMICO

1. **Generación de la población inicial:** Se hará en la primera parte de forma aleatoria para determinar cuáles albergues serán habilitados y en la segunda parte se aplicará la heurística del vecino más cercano para la asignación de puntos de encuentro a estos albergues. Es aquí donde se crea la piscina de soluciones que se va a dar al calcular los fitness (tiempo

de recorrido) de todos los agentes y viendo en todo momento que se cumplan las restricciones, hay que aclarar que la piscina de soluciones se debe mantener constante en todo momento y se va actualizando con las mejores soluciones a medida que se apliquen los operadores.

2. **Selección:** Realizar selección de padres por medio de la técnica de torneo probabilístico.
3. **Cruce:** Hacer cruce de codificación no binaria. Se escoge la primera ruta de un albergue escogido aleatoriamente y se intercambia con la primera ruta de otro albergue escogido también aleatoriamente. Aquí se calcula su fitness y se escogen solo las mejores entre las soluciones iniciales y los hijos para que ingresen a la piscina de soluciones.
4. **Mutación:** Hacer mutación SWAP en el vector de rutas a todos los agentes de la piscina de soluciones. Se escoge un punto de encuentro al azar de una ruta y se intercambia por otro punto de encuentro escogido también al azar de otra ruta, verificando que se cumplan las restricciones.
5. **Operador de mejora CustMove:** Hacer la relocalización en cada solución de la piscina de soluciones, en el vector ruta interno del agente (se modifica la asignación, reparar capacidades y ventanas de tiempo si es necesario).

La solución del problema de LRPTW es la localización de los albergues que van a ser utilizados y sus respectivas rutas para la recolección de personas afectadas en los puntos de encuentro.

Hay que resaltar que la piscina de soluciones se va actualizando a medida que se aplican los diferentes operadores, también se van verificando el cumplimiento de las restricciones. En las figuras 8 y 9 se muestra el diagrama general del algoritmo planteado y cada paso detalladamente.

Figura 8. Diagrama del algoritmo memético para la solución del LRPTW

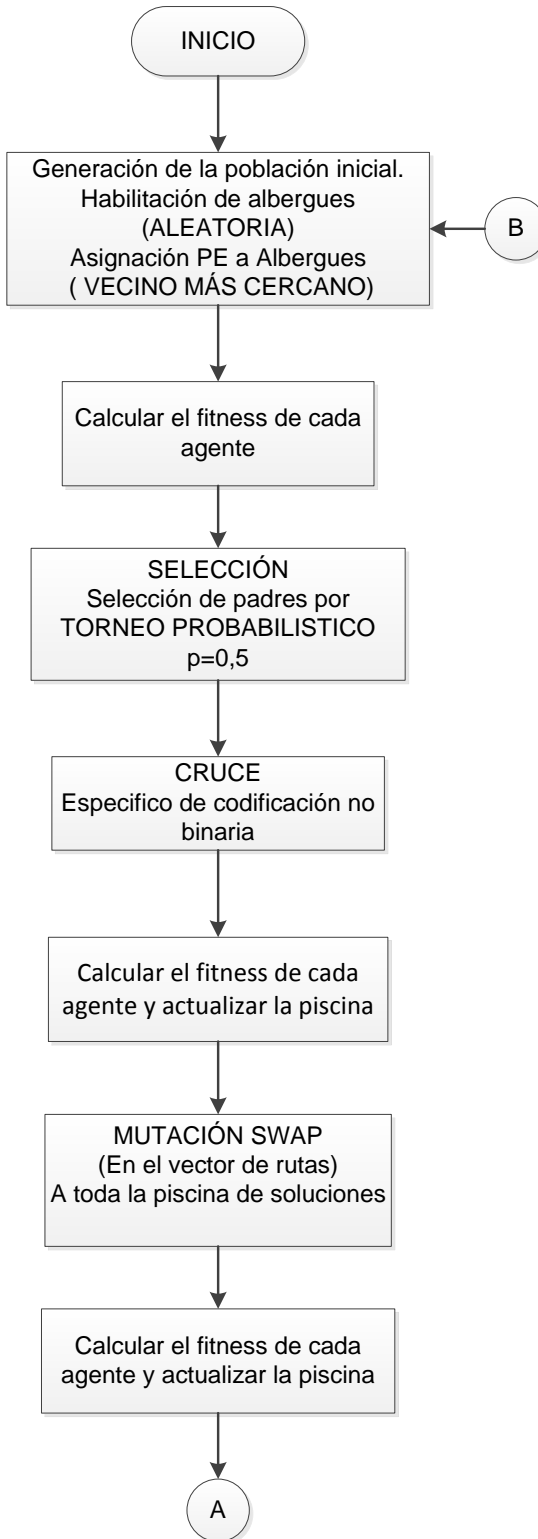
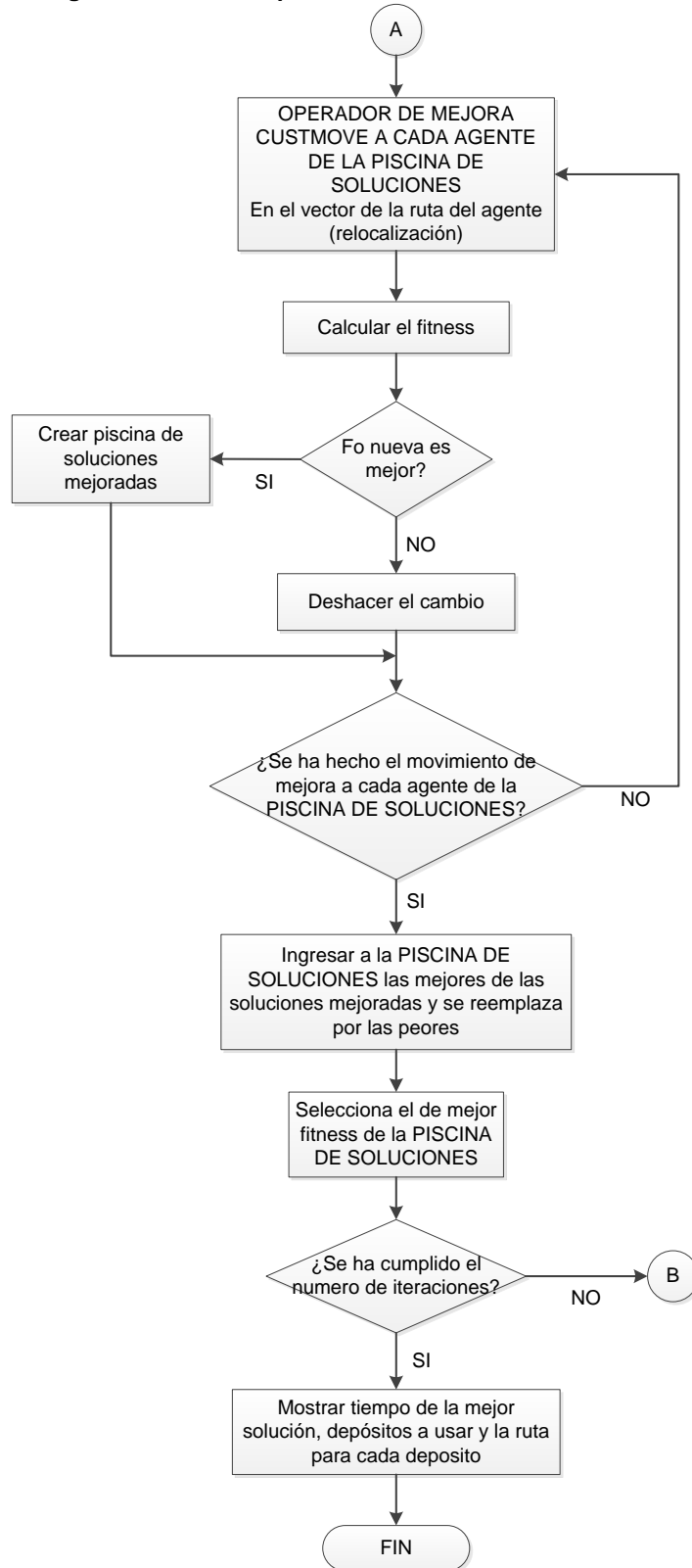


Figura 9. Diagrama del algoritmo memético para la solución del LRPTW



**8.2.1 Población inicial.** En la generación de la población inicial, el criterio principal para hacer frente es la diversificación. Si la población inicial no está bien diversificada, una convergencia prematura puede ocurrir por cualquier metaheurística de población, generando una respuesta con un óptimo local. Por ejemplo, esto puede ocurrir si se genera la población inicial usando una metaheurística de búsqueda (por ejemplo, búsqueda local, búsqueda tabú) para cada solución de la población. O si por el contrario se genera la población inicial usando búsqueda aleatoria pura, puede encontrar una solución óptima o muy cercana a la óptima pero de manera muy lenta.

Es por esto que se utiliza un enfoque híbrido para la inicialización de la población en el algoritmo, donde un agente es creado de manera aleatoria y heurística simultáneamente, explorando las diferentes regiones del espacio de soluciones con el componente aleatorio e introduciendo conocimiento del problema a tratar mediante el empleo de heurísticas.

1. Crear la parte del agente que tiene que ver con los albergues de manera aleatoria (se debe abrir al menos un albergue que la capacidad sea mayor al total de la demanda de los todos los puntos de encuentro y eso se debe cumplir siempre).
2. Crear la parte del agente que tiene que ver con los clientes (vector asignación) y que tiene que ver con las rutas de los puntos de encuentro (matriz interna de rutas) por medio de la heurística del vecino más cercano, teniendo en cuenta primero la distancia y luego las restricciones de tiempo y capacidad.
3. Calcular los tiempos de cada ruta de cada solución, así cuando se vaya a hallar la función objetivo de una solución, será el tiempo más grande de todas las rutas (ejemplo para una solución de 3 rutas:  $t_{sol1}=t_{evac}=\max(truta1;truta2;truta3)$ ).
4. Verificar si la población está completa. Si es así, seguir al paso 5. Si no, volver al paso 1 hasta que se complete la población inicial.

5. Si todos los clientes fueron asignados y la población inicial está completa, finalizar.
6. Se crea la piscina de soluciones.

Heurística del vecino más cercano : Este algoritmo se trata de un procedimiento constructivo, es decir, consiste en construir paso a paso una solución del problema; usualmente son métodos deterministas y están basados en seleccionar en cada iteración el elemento con mejor evaluación. Determina una solución de acuerdo a la cercanía de la ubicación de los nodos (clientes), para visitar a cada uno partiendo del depósito y recorriendo la menor distancia o utilizando el menor tiempo o costo posible.

El algoritmo parte de elegir un nodo inicial o depósito llamado  $j_1$ , del cual se comienza a medir la distancia que hay de este nodo a los nodos restantes (clientes) con el fin de elegir ahora aquel nodo cuya distancia al depósito sea la mínima, es decir, se elige el vecino más cercano y se nombra  $j_2$ . Una vez ubicado en el nodo más cercano al depósito, se inspecciona la vecindad de este nodo para encontrar el más cercano a él, y verificar las restricciones asociadas al LRPTW. Si se satisfacen estas restricciones de capacidad y de tiempo, ahora la vecindad a inspeccionar será la vecindad del nodo actual o último nodo insertado a la ruta. De la misma forma se construye la trayectoria  $j_1, j_2, j_3, \dots, j_k, j_{k+1}, \dots, j_n$ , en donde el vértice  $j_{k+1}$  se elige tomando la mínima distancia que hay desde  $j_k$  hasta cada uno de los vértices que sean distintos a los ya elegidos  $j_1, j_2, j_3, j_k$  y para cada nodo también se evalúa si cumple con las restricciones del problema. Al terminar, se debe agregar el arco que va del vértice  $j_n$  hasta el vértice  $j_1$ .

El algoritmo del vecino más cercano hace parte de los algoritmos heurísticos, y es uno de los métodos más sencillos para brindar solución al problema de ruteo de vehículos.

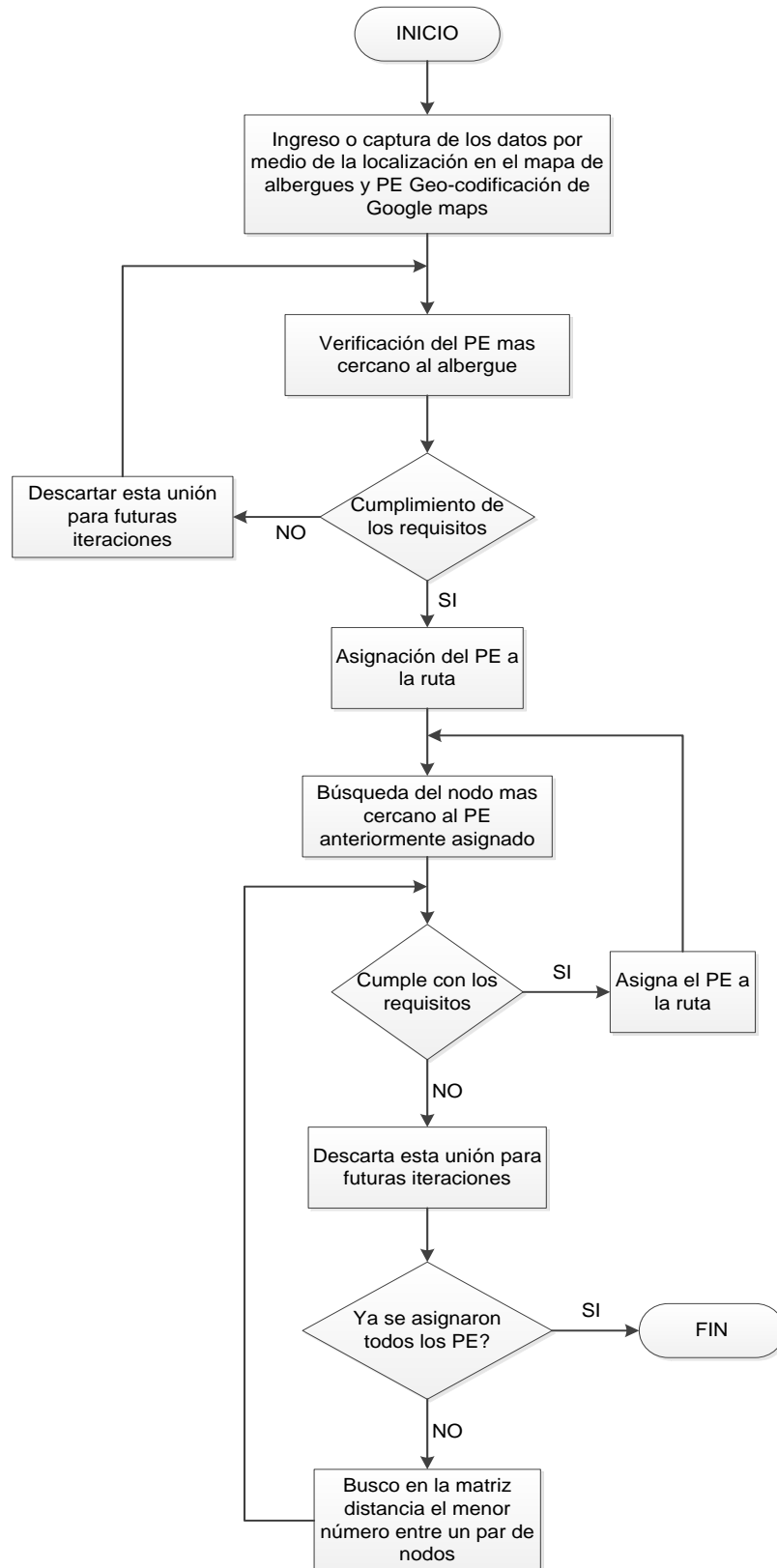
La solución que genera el algoritmo depende de que tan uniforme es la distribución de los clientes en el plano, la solución puede estar tan cerca a la óptima que no habría duda en aceptarla o tan lejos que no es mucho lo que puede aportar; esto se debe a que no se tienen en cuenta estados posteriores ni anteriores al estado actual; sin embargo, las soluciones encontradas usando este algoritmo pueden ser un buen punto de partida a la hora de aplicar el algoritmo memético.

Para la construcción de un tour se llevan a cabo los pasos descritos a continuación (ver figura 10):

1. Se empieza a construir el tour usando como punto de partida el depósito (albergue) abierto.
2. El próximo cliente elegido es el cliente (punto de encuentro) más cercano, siempre que no esté incluido en el tour.
3. Verificar si este nodo agregado a la ruta cumple las restricciones. De ser así se sigue al paso 4, si no es así se deshace y se busca el siguiente nodo más cercano.
4. Repetir el paso 2 hasta que todos los clientes estén en el tour. En cada momento hay que verificar que no se viole la restricción de capacidad de los vehículos ni las ventanas de tiempo para cada cliente.

Para observar el proceso de solución de un problema de ruteo con ventanas de tiempo aplicando la heurística del vecino más cercano dirigirse al anexo B.

Figura 10. Diagrama de la heurística del vecino más cercano.



**8.2.2 Selección.** El mecanismo de selección es uno de los principales componentes de búsqueda en un algoritmo genético. El principal principio de los métodos de selección es: “entre mejor sea un individuo, mayor es su probabilidad de ser un padre”. Esta presión de selección impulsará a la población a mejores soluciones, sin embargo, los peores individuos no deben ser descartados y deben tener alguna oportunidad de ser seleccionados. La estrategia de selección determina qué individuos son elegidos para la reproducción y el número de descendientes que produce cada individuo seleccionado.

Los padres son seleccionados en función de su aptitud a través de una de las siguientes estrategias: selección de rueda de la ruleta, muestreo estocástico universal, selección por torneo y selección basada en el rango.

Para el diseño del algoritmo memético se ha optado por la selección por torneo probabilístico para la selección de los padres. Este método es de las mejores opciones para la selección de padres debido a que hace una comparación directa entre  $q$  soluciones. Cuando participan muchos individuos en un torneo, la presión de selección es elevada y los peores individuos apenas tienen oportunidades de reproducción. Por el contrario, cuando el tamaño del torneo es reducido, la presión de selección disminuye y los peores individuos tienen más oportunidades de ser seleccionados, además se deja el camino abierto para la exploración de nuevas regiones en el espacio de búsqueda<sup>79</sup>.

1. Escoger tamaño de torneo  $q=2$ .
2. Escoger el parámetro fijo  $p$  ( $0.5 < p \leq 1$ ).

---

<sup>79</sup> GESTAL, Marcos, et al. Introducción a los algoritmos genéticos y la programación genética. Universidad da Coruña. 2010. No.140. p.50-60.

3. Generar un número aleatorio entre el intervalo  $[0, 1]$ , si es mayor que el parámetro  $p$  se escoge el individuo más alto del torneo y en caso contrario se escoge el menos apto.
4. Repetir hasta llenar la población de padres deseados.

Tamaño torneo  $q=2$

Parámetro  $p=0.6$

**8.2.3 Cruce y mutación.** El cromosoma en el algoritmo memético se compone de dos tipos de codificación diferentes, números de codificación binaria en el estado de depósito y codificación entera en la asignación de clientes y rutas establecidas. Por lo tanto diferentes operadores reproductivos deben utilizarse para las diferentes partes del cromosoma con el objetivo de que los cambios sean factibles y se acomoden a las restricciones del problema.

Para el diseño del algoritmo memético se utilizan los operadores de cruce y mutación para explorar nuevas soluciones en el espacio de búsqueda. En general, se aplica operador de cruce en la parte de las rutas del agente para obtener nuevas soluciones mediante el intercambio de información. Se utiliza cruce específico de codificación no binaria, donde se intercambia la primera ruta de un albergue escogido al azar con la primera ruta de otro albergue escogido de igual manera, debido a que no se puede hacer el cruce en la parte binaria del cromosoma porque haría una asignación y otras rutas, es decir, crearía nuevas soluciones mas no las mejoraría.

La mutación se realiza generalmente mediante la modificación del gen dentro de un cromosoma. Se implementa mutación de intercambio clásica para la parte de las rutas del agente. En este operador, se selecciona al azar dos clientes de diferentes rutas y se intercambian sus posiciones.

Operadores de cruce y mutación pueden dar lugar a una solución no factible. Por lo tanto, después de cada operador de reproducción, la verificación de factibilidad debe ser realizada. En primer lugar, se debe verificar que todos los clientes están asignados a cualquier depósito abierto. Si falla, entonces el primer depósito cerrado se abre y el estado del depósito se cambia de 0 a 1. En segundo lugar, la restricción de la capacidad de cada depósito abierto debe comprobarse. Si existe una violación de la capacidad de cualquier depósito abierto, entonces el último cliente asignado se retira del depósito correspondiente y se asigna al primer depósito abierto que tiene suficiente capacidad. Si ninguno de los depósitos tiene suficiente capacidad para asignar el cliente correspondiente, uno de los depósitos más cercanos se abre al azar. En tercer lugar se debe verificar la restricción de ventanas de tiempo de los clientes asignados al depósito. Si la restricción no se cumple se debe extraer el cliente de la ruta del depósito y buscar otra ruta o depósito donde sí se cumpla la ventana de tiempo de dicho cliente.

#### Operador de cruce:

1. Configuración inicial, cruce específico de codificación no binaria.
2. Se escoge el agente al que se le va a hacer el cruce aleatoriamente de la piscina de soluciones.
3. Se seleccionan dos albergues aleatoriamente de esta solución.
4. Se selecciona la primera ruta de los dos albergues escogidos en el paso 3 y se intercambian
5. Se verifica que cumpla las restricciones, si no se cumplen las restricciones se repara la solución.

#### Operador de mutación Swap:

1. Configuración inicial, tipo de mutación.
2. Se escoge un punto de encuentro al azar de una ruta y se intercambia por otro punto de encuentro escogido también al azar de otra ruta.

3. Reparar generación, garantizar cumplimiento de ventanas de tiempo y capacidad.
4. Calcular el valor de la función objetivo.

**8.2.4 Operador de mejora.** La característica más distintiva y que más contribuye al éxito de los algoritmos meméticos es el empleo de estrategias de búsqueda local (LS).

En cada generación del algoritmo memético, se implementa un procedimiento heurístico como un algoritmo de búsqueda local (LS) para mejorar la descendencia obtenida por los operadores genéticos (reproductivos).

El operador de mejora escogido para el algoritmo memético es uno de los cinco operadores de vecindad utilizados en el trabajo de Karaoglan & Altiparmak (2015)<sup>80</sup> para el problema de localización-ruteo capacitado con backhauls mixtos. El operador CustMove consiste básicamente en escoger aleatoriamente un cliente y removerlo de su posición actual e insertarlo en la mejor posición de la misma ruta u otra ruta que pertenece al mismo deposito o a otro deposito diferente, ver figura 11.

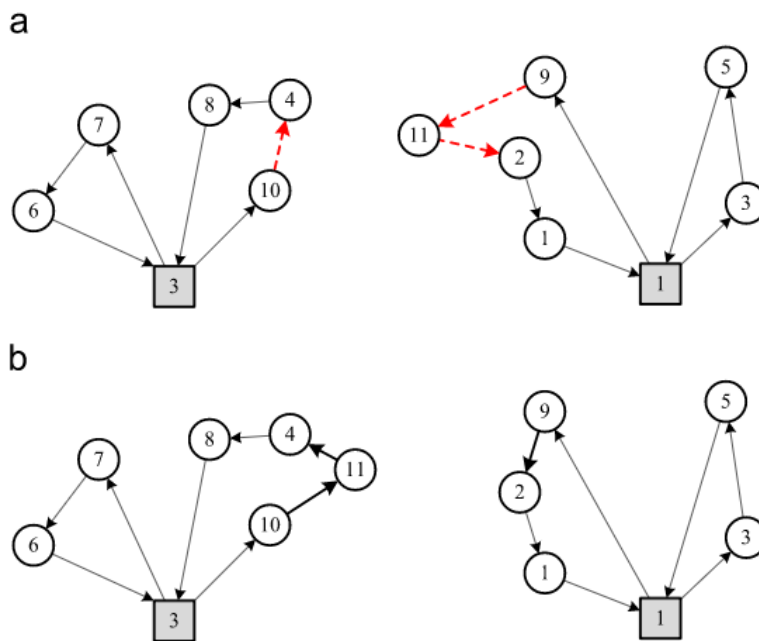
1. Configuración inicial, numero de iteraciones (iteraciones = número de agentes en la piscina de soluciones)
2. Aplicar operador CustMove (relocalización) al agente (en el vector o matriz ruta).
3. Calcular función objetivo (fitness).
4. Verificar si el valor de la función objetivo es mejor, si es mejor, crear piscina de soluciones mejoradas. Si no, deshacer el cambio.

---

<sup>80</sup> KARAOG LAN, I. AND ALTIPARMAK, F. A memetic algorithm for the capacitated location-routing problem with mixed backhauls. Computers & Operations Research. 2015. Vol.55. p. 200–216.

5. Verificar si se cumple el número de iteraciones, si cumple, ingresar a la piscina de soluciones las mejores de la piscina de soluciones mejoradas y se reemplaza por las peores. Si no, volver al paso 2.
6. En la piscina de soluciones (actualizada, mejorada) seleccionar el agente de mejor fitness (menor tiempo).

Figura 11. Ejemplo Operador de mejora CustMove.



Fuente. KARAOGLAN, I. y ALTIPARMAK, F., Op Cit. p. 209.

## 9. INSTANCIAS

Una instancia o experimento se obtiene otorgando valores específicos a todos los parámetros de un problema.

Para el LRPTW no se encontraron instancias establecidas para verificar la eficiencia de algún método de solución en particular. En esta investigación se optó por utilizar la librería de prueba realizada por Prodhon<sup>81</sup> para el CLRP, donde se considera localización y ruteo con vehículos y depósitos capacitados. Las instancias del CLRP consideran variables de decisión semejantes al LRPTW, sin incluir las ventanas de tiempo.

### **Instancias CLRP**

Con base en los resultados presentados por Prodhon, se realiza una comparación de las soluciones generadas por el método propuesto para la solución del LRPTW.

Las instancias utilizadas tienen 5 y 10 posibles localizaciones de depósitos y 20, 50, 100 y 200 clientes. Además de esto las capacidades de los vehículos varían de 70 a 150.

La eficacia del algoritmo expuesto en este trabajo se prueba en las instancias coord20, coord50, coord100 y coord200 de Prodhon (Ver Anexo C), con el fin de conocer el funcionamiento del mismo en los diferentes escenarios de LRP.

### **9.1 VALIDACION DEL ALGORITMO**

En la tabla 5 se encuentran los resultados obtenidos de las instancias con el algoritmo memético, la mejor solución conocida y el diferencial Gap entre las dos soluciones.

---

<sup>81</sup> PRODHON, CAROLINE. [sitio web]. Francia: Instancias de Prohon para el LRP. [Consulta: 20 septiembre 2016]. Disponible en: [http://prodhonc.free.fr/Instances/instances\\_us.htm](http://prodhonc.free.fr/Instances/instances_us.htm).

Tabla 5. Comparación de resultados obtenidos.

	BKS			ALGORITMO MEMETICO			Gap %
	nbdep	nbveh	cd	nbdep	nbveh	cd	
20-5-1a	3	5	25549	3	5	28893	-13,0885749 %
20-5-1b	2	3	15497	3	3	33578	-116,674195 %
20-5-2a	3	5	24196	3	5	<b>22769</b>	<b>5,89766904 %</b>
20-5-2b	2	3	13911	4	4	36499	-162,375099 %
50-5-1	3	12	25442	4	12	39089	-53,639651 %
50-5-1b	2	6	15385	3	6	28733	-86,759831 %
50-5-2	3	12	29319	4	12	41637	-42,0137112 %
50-5-2b	3	6	29319	3	6	35084	-19,6630172 %
50-5-2bis	3	12	19785	3	12	<b>16928</b>	<b>14,4402325 %</b>
50-5-2bbis	3	6	18763	3	6	19499	-3,92261365 %
50-5-3	2	12	18961	3	12	37954	-100,168767 %
50-5-3b	2	6	18961	2	6	19416	-2,39966247 %
100-5-1	3	24	132890	3	24	144012	-8,36932802 %
100-5-1b	3	11	132890	3	11	140196	-5,49778012 %
100-5-2	2	24	102246	3	24	154994	-51,5893042 %
100-5-2b	2	11	102246	4	11	199356	-94,9768206 %
100-5-3	2	24	88287	3	24	138923	-57,3538573 %
100-5-3b	2	11	88287	2	12	<b>88287</b>	<b>0</b>
100-10-1	3	26	154942	5	25	456065	-194,345626 %
100-10-1b	3	12	154942	6	11	312094	-101,42634 %
100-10-2	3	25	154400	6	24	649460	-320,634715 %
100-10-2b	3	11	145956	6	11	691998	-374,114117 %
100-10-3	3	24	139411	4	24	190336	-36,5286814 %
100-10-3b	3	11	139411	5	11	255951	-83,5945514 %
200-10-1	3	47	253840	6	47	647736	-155,174913 %
200-10-1b	3	22	253840	6	22	610087	-140,34313 %
200-10-2	3	48	280370	6	48	677032	-141,478047 %
200-10-2b	3	22	280370	7	22	802192	-186,119057 %
200-10-3	3	47	272528	4	47	391967	-43,8263224 %
200-10-3b	3	22	234660	5	20	474748	-102,313134 %

\* BKS= Mejor solución conocida de la literatura, nbdep= Número de depósitos, nbveh= Número de vehículos, cd=Costo de apertura de depósitos.

Cada problema se corre una única vez con un valor fijo de 10 iteraciones. El algoritmo es implementado en Matlab versión R2012a, en un equipo con

procesador Intel ® Core ™ i5 con 8 Gb de memoria RAM instalada. El código de programación del algoritmo se presenta en el anexo F.

La función objetivo para el LRPTW propuesto es la minimización de tiempos de evacuación dada por el tiempo más largo de una ruta de cualquier depósito, en el cual la apertura de depósitos y los costos de transporte no influye en la respuesta puesto que no se busca optimizar la minimización de costos por ser un problema enfocado a la logística humanitaria, a diferencia del CLRP que además de esto tiene en cuenta la distancia total recorrida de todas las rutas.

Debido a la diferencia de las funciones objetivo no se puede hacer una comparación directa con los resultados encontrados en la literatura, ya que las instancias de Prodhon evalúan un costo total que es la suma de apertura del depósito y el costo de la ruta. El algoritmo propuesto para la solución del LRPTW no está diseñado para calcular los costos de las rutas, es por esto que se decide comparar el número de vehículos a usar, encontrando que en la gran mayoría de las instancias corridas arroja el mismo número de vehículos que los obtenidos en los mejores resultados conocidos.

De los 30 problemas tratados en la presente investigación, el algoritmo logra resultados óptimos para el costo de apertura de depósitos en los problemas 20-5-2a, 50-5-2bis y 100-5-3b alcanzando y superando el mejor valor conocido en la literatura. Para los problemas 50-5-2bbis, 50-5-3b, 100-5-1 y 100-5-1b los resultados arrojados por el algoritmo son valores muy cercanos a los conocidos en la literatura con un diferencial (gap) menor al 10%.

Para los demás problemas, la implementación del algoritmo muestra resultados de baja calidad, en comparación con los mejores conocidos en la literatura, puesto que se alejan de estos en porcentajes mayores al 10%.

En los resultados obtenidos para las instancias seleccionadas no se encontraron buenos resultados, se observa que la desviación entre los valores de costo de las

soluciones arrojadas por el algoritmo implementado y los mejores valores de costo conocidos en la literatura es muy grande.

## **10. CASO ESTUDIO**

Para demostrar la implementación del modelo propuesto, un caso de estudio se lleva a cabo para la localización de albergues y la construcción de rutas de evacuación en la ciudad de Bucaramanga (Santander) teniendo en cuenta ventanas de tiempo duras para las tres comunas con más alto riesgo sísmico.

### **10.1 DISEÑO DE LA RED DE TRANSPORTE**

La red que se utiliza para el transporte de bienes o personas es generalmente una red terrestre, aunque pudiera también considerar una red aérea, marítima o combinación de las mismas para problemas con otros tipos de transporte. La red se describe como un grafo, donde los arcos representan los segmentos o secciones de las vías, y los vértices corresponden a las uniones de los nodos de la red. Para nuestro caso en particular, los albergues y puntos de encuentro están situados en los nodos. Los arcos pueden ser dirigidos o no dirigidos, dependiendo de si se permite la circulación en un único sentido o en ambos sentidos (por ejemplo, calles de una única dirección o de ambos sentidos de circulación), cada arco tendrá un peso, que en este caso es el tiempo de viaje, el cual depende de la distancia recorrida, la velocidad del vehículo y del momento en que se recorra el arco (condiciones de tráfico).

La mayor parte de problemas abordados en la literatura son de tipo simétrico, simplificando el modelo matemático, sin embargo, en este caso los modelos no representan la realidad adecuadamente. En esta investigación se construye la red teniendo en cuenta las direcciones de las vías, por lo cual se considera que el problema es asimétrico.

Para la construcción de la red de distribución se usa el sistema de información geográfica SIG proporcionado de la API de Google Maps que permite realizar las siguientes funciones:

- Geo-localización de los albergues y puntos de encuentro (PE).
- Análisis de la red de transporte, red de carreteras, sentido de circulación de las vías.
- Representación geográfica de la solución (rutas óptimas para cada vehículo).

Las solicitudes de información necesaria se hacen al servidor de Google Maps por medio de módulos de código que proporcionen acceso a diferentes herramientas como lo son:

- Matriz de distancias: Es un servicio que proporciona las distancias y el tiempo de viaje tomando como referencia la matriz origen-destino. Teniendo en cuenta el modo de transporte y sentido de circulación de las vías, basándose en la red de carreteras actual. Para el caso de estudio se toma el módulo de transporte por conducción, el cual solicita el cálculo de la distancia usando la red de carreteras, a una velocidad promedio de 35 km/h.
- Geo-codificación de Google Maps: Este servicio está diseñado para convertir direcciones (calle, carrera) en coordenadas geográficas (latitud, longitud), que a su vez se pueden convertir en marcadores en el mapa de referencia. Las direcciones que se desea geo-codificar deben estar en el formato utilizado por el servicio postal nacional del país.

## **10.2 ANÁLISIS DE MAPAS**

Se emplea el mapa de la división política de Bucaramanga para la representación de los albergues candidatos y los puntos de encuentro establecidos por medio de la herramienta de georreferenciación (Google Maps), la cual permitió establecer la localización exacta de los lugares con base en una búsqueda exploratoria, debido a la falta de información de algunas dependencias consultadas.

El tipo de albergues temporales son espacios para dar protección a las personas que han sido desplazadas por una emergencia o están en riesgo de sufrirla; en los albergues se proporciona temporalmente techo, alimentación, vestido y salud a las personas vulnerables, antes, durante o después de la ocurrencia de un fenómeno destructivo. Generalmente están ubicados en campos (escenarios) deportivos, parques, escuelas, colegios, salones comunales, entre otros. En estos sitios se construyen tiendas de campaña o viviendas. Este tipo de albergue es el más usado cuando la emergencia se debe a un terremoto.

Por otra parte, los puntos de encuentro son zonas determinadas con anterioridad para la concentración de las personas que evacuan algún recinto en caso de emergencia. Los sitios que se consideran puntos de encuentro son aquellos que tienen un campo abierto, en lo posible despejado y alejado de las zonas afectadas. El propósito de los puntos de encuentro es proveer un lugar seguro donde se pueda verificar el número y el estado de personas a evacuar y ser transportados a un recinto que pueda satisfacer sus necesidades.

En la tabla 6 se muestra los símbolos que se usaran para representar los albergues potenciales y puntos de encuentro establecidos. En la figura 12 se muestra el mapa donde se encuentra la ubicación de los puntos de encuentro y albergues.

Tabla 6. Representación lugares en el mapa.



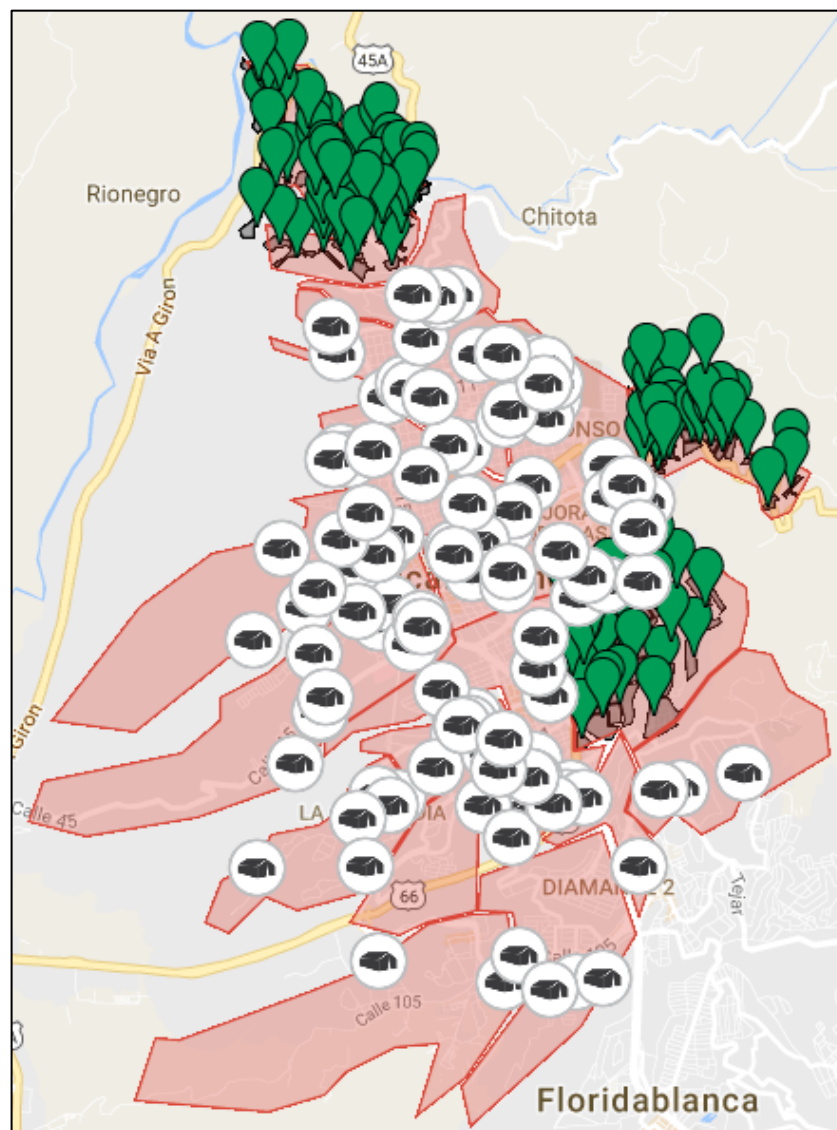
LUGAR	ICONO
PUNTO DE ENCUENTRO	
ALBERGUE	

Figura 12. Ubicación de los albergues y puntos de encuentro en el mapa



**10.2.1 Descripción de la ruta.** Se deben trazar las rutas correspondientes de cada albergue abierto teniendo en cuenta el procedimiento más adecuado para hallar la distancia entre los nodos, la secuencia del recorrido y las vías establecidas para el caso de emergencia. Cada ruta consta de una secuencia de nodos, donde el nodo de inicio y de terminación corresponde al albergue y los demás representan los nodos de clientes, que en este caso corresponden a los puntos de encuentro. Cada ruta factible es recorrida por un vehículo con capacidad finita, la cual satisface la demanda de todos los clientes que se encuentran en la ruta, y además cumple las ventanas de tiempo establecidas para cada punto de encuentro.

**10.2.2 Estudio de la capacidad de los albergues.** Para determinar la cantidad de damnificados (o puntos de encuentro) que se pueden asignar a cada uno de los albergues se debe tener en cuenta el tipo de albergue. Los albergues se derivan en tres grupos: colegios, parques y polideportivos. El análisis de la capacidad de los diferentes tipos de albergues en la ciudad de Bucaramanga fue modificado de la investigación realizada por Barrera y Hernández (2015)<sup>82</sup> en su trabajo de grado sobre la distribución de recursos post-desastre. Los resultados de dicho análisis se presentan en el anexo D. En el anexo E se muestran los albergues ubicados en el mapa con su respectiva demanda y dirección.

---

<sup>82</sup> HERNÁNDEZ, Angie y BARRERA, Andrés. Op cit. p 61-65.

**10.2.3 Estudio del nivel de afectación por comuna.** El estudio realizado por Maldonado y Chio<sup>83</sup> permite identificar las zonas que probablemente serían las más afectadas ante diferentes escenarios sísmicos. Se hace mayor énfasis o referencia a escenarios de intensidad VI en adelante, ya que son los escenarios más probables a ocurrir en la ciudad de Bucaramanga. En la tabla 7 se presentan, para los diferentes escenarios establecidos, las zonas por nivel de afectación donde el nivel 1 corresponde al mayor grado de daño alcanzado.

**Tabla 7. Zonas más afectadas de acuerdo a los escenarios.**

NIVEL DE AFECTACIÓN	NIVELES DE INTENSIDAD				
	VI	VII	VIII	IX	X
1	Zona 12	Zona 12	Zona 12	Zona 12	Zona 12
2	Zona 18	Zona 18	Zona 18	Zona 18	Zona 18
3	Zona 9A y 11	Zona 9A y 11	Zona 11	Zona 11	Zona 13
4			Zona 9	Zona 13	Zona 11
5				Zona 6 y 4	Zona 6
6					Zona 4
7					Zona 17

Fuente. MALDONADO, Esperanza, y CHIO, Gustavo., Op Cit., p. 99-116.

A partir de la anterior comparación se identificaron las zonas de mayor afectación, siendo las que se presentan en las zonas 12, 18 y 11, que representan las comunas de Morrónico, Norte y Cabecera respectivamente. De estas se resalta la condición de encontrarse localizadas dentro de las tres zonas sísmicas definidas en la ciudad partiendo del estudio de Microzonificación Sismogeotécnica del Área Metropolitana de Bucaramanga. Estas zonas son: Zona Rocosa, Zona de Suelo Rígido o Zona de Llenos.

<sup>83</sup> MALDONADO, Esperanza, y CHIO, Gustavo. Identificación de las zonas sísmicas más vulnerables de la ciudad de Bucaramanga. UIS. Revista de la facultad de ingenierías Fisicomecánicas. 2005. Vol. 4. No.2 p. 99-116.

En el estudio se establece que en la comuna Morrорico, las edificaciones alcanzan un estado de daño fuerte ante las intensidades VI, VII y VIII, pero pueden llegar al colapso ante un sismo de intensidad superior IX. Es por esto que la mayor atención se debe presentar en esta zona, ya que habrá un mayor porcentaje de personas afectadas que van a necesitar movilización hacia albergues temporales.

Para el caso estudio se establece un nivel de intensidad VII donde, según el estudio indicativo de la vulnerabilidad sísmica de Bucaramanga<sup>84</sup>, el porcentaje de edificaciones dañadas en las zonas de Cabecera, Norte y Morrорico corresponden al 10-30%, 30-60% y 60-100% respectivamente, y las zonas restantes sufrirán daños por debajo del 10%. Es por esta razón que también se debe presentar una atención prioritaria a estas zonas más vulnerables ya que el porcentaje de personas afectadas será considerable al momento de un desastre sísmico.

**10.2.4 Estudio de la demanda de los puntos de encuentro.** Para calcular el número de puntos de encuentro y la cantidad de personas a ser evacuadas en cada uno de estos, se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Comunas a ser evacuadas.
- Área habitada de cada comuna.
- Porcentaje de personas afectadas o a ser evacuadas por comuna.
- Número de personas por metro cuadrado.
- Área que cubre o abastece un punto de encuentro.
- Porcentaje de personas a evacuar en cada lapso de tiempo.

---

<sup>84</sup> MALDONADO, Esperanza y CHIO, Gustavo. Vulnerabilidad sísmica indicativa del municipio de Bucaramanga. Ciudad Digital- Universidad Industrial de Santander. 2002. No. 66.

Esta establecido según Maldonado y Chio<sup>85</sup>, que las comunas más vulnerables a sufrir pérdidas y daños por su ubicación geográfica o por las estructuras de las viviendas, son la comuna Cabecera, la comuna Morrорico, y la comuna Norte. Además, en las comunas Norte y Morrорico se encuentran asentamientos y población desplazada, lo cual crea sobrepoblación y construcción de viviendas de mala infraestructura, incrementando el riesgo de sufrir pérdidas por un desastre.

Para cada comuna se supone un porcentaje aproximado de las personas que van o pueden ser afectadas, o que buscan ser evacuadas. Se establece entonces un porcentaje de 30%, 75%, y 50% para las comunas de Cabecera, Morrорico, y Norte, respectivamente, basándose en los posibles daños que pueden presentarse en las edificaciones para el caso de estudio establecido.

El número de personas por metro cuadrado en cada comuna se establece dividiendo el número aproximado de personas a evacuar por comuna sobre el área habitada total de la comuna (en metros cuadrados), como se ve en la tabla 8.

**Tabla 8. Habitantes a evacuar por comuna.**

Comuna	CABECERA	NORTE	MORRORICO
<b>TOTAL HABITANTES POR COMUNA:</b>	<b>33404</b>	<b>54183</b>	<b>22936</b>
<b>% DE POBLACION A EVACUAR:</b>	<b>30%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>
<b>POBLACION A EVACUAR POR COMUNA:</b>	<b>10022</b>	<b>27092</b>	<b>17202</b>
<b>AREA TOTAL COMUNA (m2):</b>	2670000	2290000	1280000
<b>Relación (hab/m2):</b>	0,003754	0,01183057	0,013439063

El área que cubre o a la cual brinda servicio cada punto de encuentro se establece por medio de la API de Google Maps, seleccionando una sección o varias cuadras y midiendo su área, luego en el centroide de dicha área se ubica el punto de encuentro sobre la calle o la carrera. Usualmente se escogían cuatro o cinco

<sup>85</sup> MALDONADO, Esperanza, y CHIO, Gustavo., Op Cit., p. 99-116.



se repetiría 10 veces), ya que después de un tiempo  $t$ , el punto de encuentro va a tener más evacuados para recoger.

Luego de establecer todos los parámetros, se puede calcular el número de personas en cada punto de encuentro. Para esto se debe multiplicar cada una de las áreas asignada a cada punto de encuentro por el número de habitantes por metro cuadrado en cada comuna. El resultado será el número total de personas asignadas a cada punto de encuentro, y este se multiplica por el 10% para establecer el número de personas que van a llegar en cada lapso de tiempo  $t$ . Para un mejor entendimiento remitirse al anexo E donde se detalla el procedimiento realizado para los diferentes cálculos.

**10.2.5 Descripción de las ventanas de tiempo.** En logística se ha prestado especial atención a la mejora de la calidad del servicio mediante el aumento de la satisfacción del cliente, que solo se logrará mediante la atención rápida y oportuna. En el contexto de logística humanitaria, la gestión de la cadena de suministro de recursos y servicios críticos con desafíos como demanda desconocida, suministros inciertos, ventanas de tiempo críticas frente a la vulnerabilidad de infraestructura, y amplio alcance y magnitud de las operaciones<sup>86</sup>, es necesaria para suplir las necesidades de los afectados en un desastre de manera oportuna.

Es claro entonces que la restricción de ventanas de tiempo, las cuales se deben asignar según el nivel de vulnerabilidad de infraestructura, es imprescindible para la programación de rutas, ya que obligan que la solución este centrada en el cumplimiento de los horarios de atención, además de priorizar a las personas que necesiten una atención de manera inmediata o urgente, y limitar el horizonte de evacuación a un tiempo razonable de respuesta inicial.

Se justifica que el comienzo de las ventanas de tiempo ( $a_i$ ) en todos los puntos de encuentro sea igual a cero (0), ya que al ser una situación de emergencia la

---

<sup>86</sup> APTE, Aruna., Op. cit.,p. 1-100.

atención inmediata es primordial. Para el cierre de la ventana de tiempo dura, se establece un parámetro bi el cual depende del nivel de vulnerabilidad sísmica por comuna, con base en el estudio de Maldonado y Chio<sup>87</sup> del cual se extraen los porcentajes de vulnerabilidad de daños en edificaciones y se establece la prioridad de evacuación para cada una de las comunas, es decir, se le asignará un tiempo de cierre más pequeño a la comuna con mayor vulnerabilidad, que a las comunas con menor vulnerabilidad.

La manera adecuada para establecer el parámetro de ventana de tiempo, sería por medio de un estudio de vulnerabilidad sísmica dentro de cada comuna, para identificar cuales áreas, que comprende cada punto de encuentro, son mas propensas a verse afectadas por un desastre y por consiguiente necesitaran una atención primordial ante otros puntos de la misma comuna. Otra manera, sería por medio de la identificación del estrato de las viviendas en el área que comprende un punto de encuentro, ya que comúnmente el nivel socioeconómico de las personas está directamente relacionado con la calidad de las infraestructuras de las viviendas donde habitan, esto para dar prioridad de evacuación a las estructuras más vulnerables dentro de la misma comuna.

Debido a que no se cuenta con ninguno de los estudios discutidos, no es posible establecer un criterio para priorizar y asignar las ventanas de tiempo dentro de una misma área sin violar los factores éticos de equidad que se tienen en cuenta en la logística humanitaria, los cuales establecen que todos los clientes deben ser atendidos de manera equitativa.

Teniendo en cuenta que el horizonte de planeación para las operaciones de evacuación y rescate dentro del tiempo de alivio estándar (SRT) en logística humanitaria es de 72 horas<sup>88</sup>. El caso de estudio está enfocado en el primer lapso de tiempo  $t$ , que representa el 10% del tiempo total, es decir 7.2 horas.

---

<sup>87</sup> MALDONADO, Esperanza, y CHIO, Gustavo., Op Cit., p. 99-116.

<sup>88</sup> OZDAMAR, L., EKINZI, E., & KUCUKYAZICI, B. Op cit. p. 217–245.

El parámetro  $b_i$  para cada comuna se obtiene dividiendo el horizonte de evacuación (7.2 horas), en tres partes, que representarán los tiempos máximos para la realización de operaciones de rescate de manera simultánea en cada comuna. La primera parte, será igual al primer tercio del horizonte, redondeado al valor entero más próximo. De igual manera se calculan la segunda y tercera parte, pero acumulando los valores para lograr una ventana máxima igual al horizonte de planeación. Por lo tanto, se establece que la primera parte será igual a 3 horas (180 mins), la segunda a 5 horas (300 mins) y la tercera será igual a 7 horas (420 mins), para las comunas de Morrónico, Norte y Cabecera, respectivamente, que se utilizarán o analizarán en el caso estudio.

Con el criterio de ventanas de tiempo establecidas para cada comuna es posible simular dos escenarios para evaluar las diferencias entre ventanas homogéneas y aleatorias, para cada punto de encuentro. A continuación se describen los escenarios diseñados:

- Escenario 1: Ventanas de tiempo homogéneas. Tiempo de inicio  $a_i = 0$  y tiempo de cierre  $b_i =$  tiempo máximo de evacuación por comuna.
- Escenario 2: Ventanas de tiempo aleatorias. Tiempo de inicio  $a_i = 0$  y tiempo de cierre  $b_i =$  Número aleatorio. Este número aleatorio se genera en un rango comprendido entre  $a_i$  y el tiempo máximo de evacuación por comuna.

### 10.3 SUPUESTOS DEL CASO ESTUDIO

Para el caso de estudio presentado en esta investigación se tuvieron en cuenta los siguientes supuestos:

- Se redujo el problema para enfocarlo a las zonas más vulnerables de la ciudad.
- El porcentaje de personas afectadas está relacionada con el porcentaje de edificaciones dañadas ante un sismo de nivel VII.
- Del conjunto de los posibles albergues no se tuvieron en cuenta los que se encuentran ubicados en las comunas Morrорico, Cabecera y Norte.
- Algunos puntos de encuentro pueden requerir rescate repetido, debido a que la cantidad de víctimas en el nodo es mayor a la capacidad de los vehículos. Por esto se consideró que el 10% del total de víctimas asignadas a un punto de encuentro llegan en un lapso de tiempo  $t$ , ya que no todas las personas evacuan al mismo tiempo. La respuesta del caso se basa en la construcción de una ruta para un tiempo  $t$  que se puede repetir  $n$  veces para satisfacer el 100% de la demanda del punto de encuentro.
- Todas las vías estarán en buen estado para realizar la evacuación.
- Para la asignación de la prioridad de las ventanas de tiempo por comuna se tuvo en cuenta el porcentaje de edificaciones dañadas ante un sismo de nivel VII.
- Para la asignación de la prioridad de las ventanas de tiempo para cada punto de encuentro de cada comuna se establecen dos escenarios sujetos a cambios cuando se tenga información precisa de un estudio.
- Se tiene que asignar toda la demanda de un punto de encuentro a un mismo albergue, es decir, no puede haber demandas divididas.

## **11.RESULTADOS Y ANALISIS**

Para el caso descrito en la sección 12 se desarrolla un escenario de prueba, en el que se considera la eventualidad de un sismo con intensidad VII. Sobre el caso de estudio se aplica el algoritmo memético propuesto para el LRPTW, descrito en la sección 9. El algoritmo es codificado en el lenguaje de programación Matlab versión R2012a y quedará como una herramienta computacional flexible para ser implementado en diferentes escenarios de desastres sísmicos. Además de esto, la herramienta puede ser utilizada no solo en la logística humanitaria sino también en la logística comercial donde se aborde el problema de localización y ruteo.

Como resultado del caso de estudio para esta investigación se hace una propuesta al Plan Local de Emergencias y Contingencias de la ciudad de Bucaramanga.

En el plan local de emergencias y contingencias de la ciudad de Bucaramanga el cual se revisó en el anexo A, está incluido el plan maestro de contingencia para sismo y fenómenos de remoción de masa, en donde se puede añadir los resultados obtenidos en el caso estudio para la modificación del plan.

### **11.1 PROPUESTA AL PLAN LOCAL DE EMERGENCIAS Y CONTINGENCIAS DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA**

Se hace uso de una herramienta computacional desarrollada en el software Matlab versión R2012a, en un equipo con procesador Intel ® Core ™ i5 con 8 Gb de memoria RAM instalada, para abordar dos escenarios de evacuación, con diferentes ventanas de tiempo, de las tres comunas de la ciudad con mayor vulnerabilidad (Morrórico, Norte y Cabecera), en donde se establece el nivel de afectación que podría sufrir cada una de estas en un sismo con nivel de intensidad VII en adelante. La herramienta arroja como resultado los albergues a ser

utilizados y la asignación de los puntos de encuentro a estos, también nos proporciona las rutas óptimas para la recolección de las personas en los puntos de encuentro a los albergues.

Se asignaron un total de 113 puntos de encuentro distribuidos entre las tres comunas para el caso, ver tabla 9.

**Tabla 9. Lista puntos de encuentro**

<b>PUNTOS DE ENCUENTRO</b>		
<b>Comuna</b>	<b>Número</b>	<b>Dirección</b>
<b>Morrórico</b>	1	Cl. 32 #49-2 a 49-92, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1290067 lng:-73.10612270000001
	2	Cra. 49 #30-1 a 30-185, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1299089 lng:-73.10623529999998
	3	Cl. 32 #47-2 a 47-84, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1292782 lng:-73.10744490000002
	4	66, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1309735 lng:-73.10728670000003
	5	Cl. 11, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1350667 lng:-73.10767829999998
	6	66, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1339597 lng:-73.10685760000001
	7	Comuna 14 Morrórico, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1361899 lng:-73.1066108
	8	Comuna 14 Morrórico, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1354514 lng:-73.10601810000003
	9	Comuna 14 Morrórico, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1363895 lng:-73.1046715
	10	Cra. 50 #24-17, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1329589 lng:-73.1051893
	11	Cra. 51 #18a-1, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1317507 lng:-73.10471710000002
	12	Cra. 51 #29-7 a 29-97, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1300686 lng:-73.1050578
	13	Via Principal Bucaramanga, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1315457 lng:-73.10303809999999
	14	Via Principal Bucaramanga, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1314207 lng:-73.10231650000003
	15	Cl. 14 #55-2 a 55-70, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1325571 lng:-73.10180960000002
	16	Cl. 18 #57-54, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1311838 lng:-73.1012945
	17	Cl. 10a #58-1, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1314106 lng:-73.09966320000001
	18	Cl. 18 #57-202, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1306754 lng:-73.10024049999998
	19	Via Principal Bucaramanga, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1328059 lng:-73.09916900000002
	20	Via Principal Bucaramanga, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.133438 lng:-73.10046850000003
	21	Via Principal Bucaramanga, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1332091 lng:-73.1019867
	22	Gualilo 1, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1376537 lng:-73.10186060000001

	23	Cl. 18 #58-33, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1300739 lng:-73.09798749999999
	24	Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1292222 lng:-73.09405809999998
	25	Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1275296 lng:-73.09406869999998
	26	Bucaramanga-Pamplona, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1256878 lng:-73.09622530000001
	27	Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1369032 lng:-73.10722229999999
	28	Cl. 10 #58-2 a 58-84, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1319769 lng:-73.09983010000002
	29	Cra. 49 #26-2 a 26-46, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.131527 lng:-73.10611189999997
	30	Cra. 50 #29-1 a 29-65, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1298556 lng:-73.10568
<b>Norte</b>	31	Rotonda, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1469035 lng:-73.1339223
	32	Cl. 6 Nte. #18-2 a 18-118, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1474423 lng:-73.1300855
	33	Cra. 15 #5 Norte-8 a 5 Norte-128, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1486293 lng:-73.13626529999999
	34	Cra. 4 #15 Norte-1 a 15 Norte-59, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1480211 lng:-73.1387785
	35	Cra. 3a #16 Norte-105, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1492541 lng:-73.14035839999997
	36	Cl. 8 Nte. #18b-1 a 18b-27, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1496926 lng:-73.13134809999997
	37	Cl. 18 Nte. #7-28, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1498456 lng:-73.13625990000003
	38	Cra. 10d #16d Norte-2, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1511523 lng:-73.1363404
	39	Cra. 20 #11a Norte-2, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1503645 lng:-73.12920830000002
	40	Cra. 18 #15 Norte-1, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1519933 lng:-73.13167870000001
	41	Cra. 18b #15 Norte-2 a 15 Norte-104, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1528848 lng:-73.130874
	42	Cra. 16 #18 Norte-1, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.153803 lng:-73.13324769999997
	43	Cra. 17a #21 Norte-1 a 21 Norte-49, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1553925 lng:-73.13307279999998
	44	Cl. 23 Nte. #17-1 a 17-115, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1563871 lng:-73.13311909999999
	45	Bucaramanga-San Alberto, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1576086 lng:-73.13155799999998
	46	Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1584124 lng:-73.1311905
	47	Cl. 21, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1556979 lng:-73.13037780000002
	48	Cra. 19, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1548648 lng:-73.13014709999999
	49	Cra. 17a #17 Norte1, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1535368 lng:-73.13171219999998
	50	Cl. 16 Nte. #18b-2 a 18b-48, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1533352 lng:-73.12954500000001
	51	Cra. 20 #21 Norte-2, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1549892 lng:-73.1293867
	52	Cra. 23 #18 Norte-2 a 18 Norte-48, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1548688 lng:-73.12773449999997
	53	Cl. 17 Nte. #22a-2, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.153986 lng:-73.1276595

54	Cl. 26a Nte. #9a-1 a 9a-75, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1553186 lng:-73.1376909
55	Cl. 26a Nte. #8-2, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1549022 lng:-73.13951810000003
56	Cl. 26 Nte., Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1556752 lng:-73.1371289
57	Cl. 29 Nte. #11b-1 a 11b-33, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1575601 lng:-73.13622370000002
58	Cl. 29a Nte. #10-2 a 10-72, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1580844 lng:-73.1372523
59	Cra. 11 #28 Norte-1, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1569725 lng:-73.13718260000002
60	Cra. 10, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1597429 lng:-73.13765999999998
61	Cl 32A #PC-70 a PC-72, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1592666 lng:-73.14133600000002
62	Via A Giron, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1600198 lng:-73.1420053
63	Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1614303 lng:-73.1411496
64	Via A Giron, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1603079 lng:-73.14027720000001
65	Madrid, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1625308 lng:-73.14125960000001
66	Madrid Nte., Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1630863 lng:-73.1403282
67	Madrid Nte., Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1640063 lng:-73.13938730000001
68	Cl. 13c Nte. #20-91, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1518415 lng:-73.12894010000002
69	Cra. 21a #15 Norte-3, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1525415 lng:-73.1284225
70	Cl. 24 Nte. #10-2 a 10-152, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1550665 lng:-73.1361948
71	Cl. 38, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1638905 lng:-73.1422038
72	Cra. 10 #23, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1579339 lng:-73.14138600000001
73	Cra. 10 #23, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1543112 lng:-73.14064000000002
74	Cra. 10 #MZ B 60, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1507171 lng:-73.142383399999997
75	Cra. 10 #21 Norte-1 a 21 Norte-45, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1536592 lng:-73.136946599999999
76	Cl. 20 Nte. #10-1 a 10-141, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1536127 lng:-73.135512899999998
77	Cl. 15 Nte. #13-1, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1510671 lng:-73.1336743
78	Cra. 12 #11 Norte-49, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1497258 lng:-73.1331217
79	Cl. 12N, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1490704 lng:-73.1347371
80	Cl. 12 Nte. #10-5, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1510784 lng:-73.130991399999997
81	Av. Libertador, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1523 lng:-73.13248340000001
82	Cl. 23 Nte. #12-2 a 12-128, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1547404 lng:-73.1359716
83	Cl. 19 Nte. #12-2 a 12-40, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1532853 lng:-73.13524740000003
84	Cra. 11 #10 Norte-1 a 10 Norte-51, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.148254 lng:-73.1333014

<b>Cabecera</b>	85	Cl. 56 #45-55, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1096759 lng:-73.10570989999997
	86	Cl 65 #45-1 a 45-67, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1069766 lng:-73.10646050000003
	87	Cl. 54 #49-39, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.112332 lng:-73.10282849999999
	88	Cra. 47A, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.11362 lng:-73.104873
	89	Cra. 52 #50-1 a 50-121, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.116745 lng:-73.101901
	90	Cra. 35 #52-1 a 52-177, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.11238 lng:-73.10913199999999
	91	Cra. 35a #48-178, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.115393 lng:-73.10907800000001
	92	Cra. 32 #58-34, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.108366 lng:-73.11082699999997
	93	Cra. 28 #56-8, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1083935 lng:-73.11300490000002
	94	Cl. 55 #28a-1 a 28a-89, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.11056 lng:-73.11391700000001
	95	Cl. 53 #31-1 a 31-195, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.111241 lng:-73.11103100000003
	96	Cl. 51 #27A-71, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.113573 lng:-73.11332700000003
	97	Cra. 28 #48-2, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.116479 lng:-73.11319800000001
	98	Cl. 46 #35A-16, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1183735 lng:-73.10905739999998
	99	Cra. 39 #48-135, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1178365 lng:-73.10722729999998
	100	Cra. 49 #50-6 a 50-518, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.118512 lng:-73.10448600000001
	101	Cra. 42 #40-2 a 40-116, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.120338 lng:-73.10623499999997
	102	Cra. 34 #46-2 a 46-182, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.117517 lng:-73.11059599999999
	103	Dg. 31 #52a-54 a 52a-82, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1115494 lng:-73.1127482
	104	Cra. 32 #48-2 a 48-110, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.11634 lng:-73.112029
	105	Cra. 40 #48-1 a 48-137, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1165005 lng:-73.10620819999997
	106	Cl. 51 #31-70, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.114009 lng:-73.11185699999999
	107	Cra. 35a #51-1 a 51-165, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.114073 lng:-73.10886399999998
	108	Cl. 54 #11, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.111348 lng:-73.10836999999998
	109	Cl. 64 #17E-103, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.105047 lng:-73.11302380000001
	110	Cra. 33 #59-197, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1079725 lng:-73.10946960000001
	111	Cra. 32 #63A-06, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.107494 lng:-73.11078399999997
	112	Cl. 63 #30-80 a 30-158, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.106929 lng:-73.11109499999998
	113	Cl. 48 #27-18 a 27-152, Bucaramanga, Santander, Colombia,0 lat:7.1166919 lng:-73.1147861

Legenda. Tipos de albergue y comunas

TIPO ALBERGUE		COMUNA	
Centro Educativo		MORRORICO	
Parque		NORTE	
Centro Deportivo		CABECERA	

Para hacer frente a la variabilidad que presentan las ventanas de tiempo en un problema de ruteo, se decide simular dos escenarios:

### ESCENARIO 1

Asignación de los puntos de encuentro a los albergues habilitados haciendo uso de ventanas de tiempo en la misma comuna. Los resultados del escenario 1 se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados escenario 1.

ALBERGUE	PUNTOS DE ENCUENTRO ASIGNADOS							
	18	16	14	13	17	102		
COLEGIO DE SANTANDER SEDE A	18	16	14	13	17	102		
COLEGIO PSICOPEDAGOGICO CARLS ROGER	36	32						
COLEGIO INTEGRADO DIVINO NIÑO	29	3	6	5	99	100	85	
COLEGIO VIRREY SOLIS	104	97	103					
COLEGIO LA CONSOLATA	80	41	49	81	83	76	75	55
COLEGIO INCADES	7	9	19	23	94	110		
COLEGIO SAN PEDRO CLAVER	86	34	35	74				
INSTITUTO LA SALLE	77	82	70	56	59	58		
COLEGIO MILITAR GENERAL SANTANDER	68	50	48	51	45	44	57	60
INSTITUCIÓN EDUCATIVA LAS AMERICAS	47	72	61	62	66			
COLEGIO GIMNASIO SUPERIOR	52							
INSTITUCIÓN EDUCATIVA SAN JOSE DE LA SALLE SEDE A	69							
INSTITUTO TÉCNICO NACIONAL DE COMERCIO SEDE A	111							
INSTITUCIÓN EDUCATIVA SANTA MARIA GORETTI - SEDE A	96							
INSTITUCIÓN EDUCATIVA AURELIO MARTINEZ MUTIS SEDE B PILOTO	67							
INSTITUCIÓN EDUCATIVA INEM "CUSTODIO GARCIA ROVIRA" SEDE A	54							
INSTITUCIÓN EDUCATIVA TECNOLÓGICO SALESIANO ELOY VALENZUELA SEDE A	30							
COLEGIO SAGRADO CORAZON DE JESUS	73							
INSTITUCIÓN EDUCATIVA CLUB UNIÓN - SEDE A	12							

INSTITUCIÓN EDUCATIVA PROVENZA - SEDE A	24								
COLEGIO FRANCISCO DE PAULA SANTANDER	78								
COLEGIO FEDERICO OZAMA	112								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA LA LIBERTAD	39								
COLEGIO CALDAS	20								
COLEGIO SAN SEBASTIAN	37								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA JORGE ARDILA DUARTE - SEDE A	87								
PARQUE CRISTO REY	107								
PARQUE SAN PIO	25								
PARQUE SANTANDER	4								
PARQUE LAS PALMAS	46								
PARQUE MEJORAS PUBLICAS	38								
PARQUE DE LAS ESTATUAS	11								
PARQUE GARCIA ROVIRA	1								
POLIDEPORTIVO LA MARTE	64								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA CAMPO HERMOSO SEDE B - JARDÍN INFANTIL CAMPO HERMOSO	53								
POLIDEPORTIVO LOS NARANJOS	90								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA GABRIELA MISTRAL	79								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA PROMOCION SOCIAL DEL NORTE SEDE A	63								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA TÉCNICO EMPRESARIAL JOSÉ MARÍA ESTEVEZ	8								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA COMUNEROS	43								
PARQUE SIMON BOLIVAR	95								
COLEGIO DE SANTANDER SEDE B - LOS ANGELES	88								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA JORGE ELIECER GAITAN SEDE A	31								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA LICEO PATRIA	15								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA MAIPORE SEDE C - JARDIN INFANTIL KENNEDY	26								
INSTITUTO TECNICO NACIONAL DE COMERCIO SEDE B - FIDELINA RAMOS	93								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA POLITECNICO SEDE B - REPUBLICA DE ECUADOR	40								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA POLITÉCNICO SEDE C- MARGARITA DIAZ OTERO	33								
COLEGIO DE SANTANDER SEDE H - REPUBLICA DE VENEZUELA	42								
COLEGIO DE SANTANDER SEDE C – BUCARAMANGA	109								
COLEGIO DE SANTANDER SEDE G - SIMON BOLIVAR	22								
INSTITUCION EDUCATIVA ANDRES PAEZ DE SOTOMAYOR	84								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA DE AUDICION Y DEL LENGUAJE CENTRABILITAR	71								
INSTITUCIÓN EDUCATIVATECNOLÓGICO SALESIANO ELOY VALENZUELA SEDE C - JAIME BARRERA PARRA	27								

INSTITUCIÓN EDUCATIVA CLUB UNION SEDE B- DIEZ Y SEIS DE MARZO	10								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA AURELIO MARTINEZ MUTIS	105								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA AURELIO MARTINEZ MUTIS SEDE C LA VICTORIA	108								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA LA MEDALLA MILAGROSA	92								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA SAN FRANCISCO DE ASIS SEDE B - LA INMACULADA	21								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA NUESTRA SEÑORA DEL PILAR SEDE C – MONTERREDONDO	89								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA NUESTRA SEÑORA DEL PILAR SEDE D - SANTA TERESITA	98								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA SAN JOSE DE LA SALLE SEDE B CENTRO INFANTIL LA VICTORIA	65								
CENTRO DE PROTECCIÓN DEL NIÑO - CLINICA DE CONDUCTA	91								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA JORGE ARDILA DUARTE SEDE B REPÚBLICA DE COSTA RICA	101								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA LUIS CARLOS GALAN SARMIENTO	106								
INSTITUCIÓN EDUCATIVA CENTRO PILOTO SIMON BOLIVAR	28								
COLISEO EDMUNDO LUNA	2								
COLISEO VICENTE DIAZ ROMERO	113								

Descripción vehículos: Se deben utilizar 68 vehículos con capacidad de 150 personas para la evacuación de 113 puntos de encuentro hacia 68 albergues habilitados.

El tiempo de evacuación para este escenario es de 368 minutos, equivalente a 6 horas con 8 minutos, el cual se encuentra dentro del horizonte de evacuación de tiempo de alivio estándar que es de 7 horas y 12 minutos.

## ESCENARIO 2

Asignación de los puntos de encuentro a los albergues habilitados haciendo uso de ventanas de tiempo aleatorias dentro del rango de tiempo máximo de evacuación en cada comuna. Los resultados del escenario 2 se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Resultados escenario 2

ALBERGUE	PUNTOS DE ENCUENTRO ASIGNADOS					
COLEGIO INTEGRADO DIVINO NIÑO	3	9	98	107	105	102
COLEGIO LA CONSOLATA	16	99	106	88		
COLEGIO METROPOLITANO REAL DE MINAS	77	76	82	55	31	69
COLEGIO SAN PEDRO CLAVER	15	28	23	26		
	86					
INSTITUTO LA SALLE	65	34				
INSTITUCIÓN EDUCATIVA BICENTENARIO DE LA INDEPENDENCIA DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA	71					
	18	13				
INSTITUCIÓN EDUCATIVA LAS AMERICAS	78	79	32	45		
	30	10	8			
INSTITUCIÓN EDUCATIVA JOSE CELESTINO MUTIS	11	1				
COLEGIO INTEGRADO NUESTRA SEÑORA DEL DIVINO AMOR	66					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA SAN JOSE DE LA SALLE SEDE A	36	35				
INSTITUCIÓN EDUCATIVA NUESTRA SEÑORA DEL PILAR SEDE A	96	113				
INSTITUTO TÉCNICO NACIONAL DE COMERCIO SEDE A	104					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA AURELIO MARTINEZ MUTIS SEDE B PILOTO	46					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA INEM "CUSTODIO GARCIA ROVIRA" SEDE A	103					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA TECNOLÓGICO SALESIANO ELOY VALENZUELA SEDE A	2					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA PROVENZA - SEDE A	97					
COLEGIO FRANCISCO DE PAULA SANTANDER	109					
COLEGIO FEDERICO OZAMA	41					
COLEGIO CALDAS	101					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA JORGE ARDILA DUARTE - SEDE A	111	110				
PARQUE SAN FRANCISCO	112					
PARQUE DE LOS NIÑOS	49	50				
PARQUE SANTANDER	92					
PARQUE MEJORAS PUBLICAS	25	24				
PARQUE ANTONIA SANTOS	60	54				
PARQUE CENTENARIO	53					
PARQUE ROMERO	61					
PARQUE ALVAREZ	43					
PARQUE DE LOS LEONES	100	4				
	87					
PARQUE PROVENZA	108					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA CAMPO HERMOSO SEDE B - JARDÍN INFANTIL CAMPO HERMOSO	84					
POLIDEPORTIVO LOS NARANJOS	85					

INSTITUCIÓN EDUCATIVA GABRIELA MISTRAL	29					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA PROMOCION SOCIAL DEL NORTE SEDE A	21					
	70					
COLEGIO DE LA SANTISIMA TRINIDAD	80	40				
SENA	52					
COLEGIO DE SANTANDER SEDE B - LOS ANGELES	56					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA JORGE ELIECER GAITAN SEDE A	17					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA LICEO PATRIA	7					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA MAIPORE SEDE B - PRESIDENTE KENNEDY	38					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA MAIPORE SEDE C - JARDIN INFANTIL KENNEDY	47					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA SANTA MARIA GORETTI SEDE C - JACQUELINE	72					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA POLITECNICO SEDE B - REPUBLICA DE ECUADOR	89					
COLEGIO DE SANTANDER SEDE C - BUCARAMANGA	68	81				
	48					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA NUESTRA SEÑORA DEL PILAR SEDE B - REYNALDO ORDUZ ARENAS	95					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA NUESTRA SEÑORA DEL PILAR SEDE E - PABLO VI	44					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA DE AUDICION Y DEL LENGUAJE CENTRABILITAR	67					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA TECNOLOGICO SALESIANO ELOY VALENZUELA SEDE B - DOMINGO SAVIO	33					
INSTITUCIÓN EDUCATIVECNOLOGICO SALESIANO ELOY VALENZUELA SEDE C - JAIME BARRERA PARRA	5					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA PROMOCION SOCIAL DEL NORTE SEDE B - SAN CRISTOBAL	93					
	51					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA PROMOCION SOCIAL DEL NORTE SEDE C - SANTA INES	27					
	39					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA PROMOCIÓN SOCIAL DEL NORTE SEDE D - TRANSICIÓN	42	73				
	64					
POLIDEPORTIVO CAMPO HERMOSO	90					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA AURELIO MARTINEZ MUTIS	83					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA AURELIO MARTINEZ MUTIS SEDE C LA VICTORIA	59					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA SAN JOSE DE LA SALLE SEDE B CENTRO INFANTIL LA VICTORIA	19					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA PARA PROBLEMAS DE APRENDIZAJE	37					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA JORGE ARDILA DUARTE SEDE B REPÚBLICA DE COSTA RICA	20					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA CENTRO PILOTO SIMON BOLIVAR	75					
INSTITUCIÓN EDUCATIVA FRANCISCO DE PAULA SANTANDER SEDE B - CRISTOBAL COLÓN	74					
COLISEO EDMUNDO LUNA	91					

Descripción vehículos: Se deben utilizar 69 vehículos con capacidad de 150 personas para la evacuación de 113 puntos de encuentro hacia 61 albergues habilitados.

El tiempo de evacuación para este escenario es de 365 minutos, equivalente a 6 horas con 5 minutos, el cual se encuentra dentro del horizonte de evacuación de tiempo de alivio estándar que es de 7 horas y 12 minutos.

### **Recomendaciones**

Se recomienda una posterior modificación a la herramienta diseñada, ya que se encuentran algunas discrepancias a los resultados esperados:

- La demanda se debe trabajar con demandas divididas con el fin de no abrir un nuevo albergue y asignar un punto de encuentro a este aun habiendo muchos albergues con holguras.
- El albergue tenga un porcentaje mínimo de ocupación de capacidad para poder ser habilitado.
- Incluir diferentes tipos de movilización para hacer la evacuación (Ej. A pie, flota heterogénea, carros particulares, etc.) con el fin de alimentar la herramienta y hacerla más enfocada a la realidad.

Para los efectos de una posterior modificación respecto a la planificación urbana e infraestructura vial se propone tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Identificar y reubicar los asentamientos que se encuentren en las zonas de alta vulnerabilidad sísmica debida a efectos colaterales de deslizamiento y ruptura de falla.

- Definir, dentro del municipio, zonas en donde se pueda asentar la población desplazada que llega a la ciudad, de tal manera que no se ubiquen en áreas de alta amenaza sísmica.
- Establecer un programa gubernamental destinado a que los propietarios de las edificaciones ubicadas en el sector Morrórico y Norte inicien labores de adecuación de sus estructuras o de reubicación.
- Estudiar la vulnerabilidad sísmica de las vías principales, consideradas como prioritarias, para evitar, en la ocurrencia de un sismo, la obstrucción de los corredores viales por acción del colapso de puentes peatonales y vehiculares.
- Plan de divulgación de puntos de encuentro.

## 12. CONCLUSIONES

- Los objetivos propuestos para la investigación “Un algoritmo memético para el problema de localización-ruteo con ventanas de tiempo para la atención de desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga” se cumplieron en su totalidad; la herramienta desarrollada arroja resultados factibles que dan solución al problema. Los resultados obtenidos son cercanos a los valores de referencia dentro del tiempo de alivio estándar (SRT), además se cumple con los parámetros y restricciones del caso estudio y fueron calculados en tiempos de computo muy cortos.
- La representación de la solución utilizada es diseñada con el objetivo de dividir la localización, la asignación y el ruteo de manera independiente en la misma solución, esto permitió tener una mejor comprensión del resultado generado por el algoritmo, además de facilitar la aplicación de distintos operadores en diferentes partes del cromosoma. Cabe resaltar que esta representación no había sido utilizada nunca en la literatura, por lo que es una nueva propuesta presentada en este trabajo y funcionaria para ser aplicado a otras variantes del LRP.
- La técnica de inicialización híbrida propuesta para la diversificación de las soluciones en la población inicial fue favorable para evitar una convergencia prematura, al no generar una respuesta con un óptimo local. Dicha técnica se diseñó usando la combinación de aleatoriedad con la heurística del vecino más cercano.

- La implementación de CustMove Operator como optimizador local para la mejora de las soluciones encontradas no tiene gran influencia en los resultados debido a que las soluciones ya se encuentran muy restringidas por las ventanas de tiempo, es decir, pocos cambios en las soluciones son factibles e impactan el tiempo de forma positiva.
- El objetivo del modelo de localización-ruteo diseñado para un caso de logística humanitaria es la minimización del tiempo de evacuación, el cual es medido como el tiempo de la ruta más larga de todos los albergues establecidos, a diferencia del CLRP que busca la minimización de costos de transporte y apertura de depósitos. Es por esto que el algoritmo propuesto muestra un desempeño regular en la resolución de las instancias en las que fue probado para el problema de localización-ruteo capacitado, puesto que no alcanza resultados óptimos.
- Durante la realización del proyecto se evidencio la carencia de información respecto al estudio de microzonificación sísmica de la ciudad de Bucaramanga, razón por la cual no fue posible agregar detalles importantes en la realización de la red, como por ejemplo la vulnerabilidad de las vías.
- El tratamiento que se da a las ventanas de tiempo en el problema de localización-ruteo influye directamente en la efectividad del método de solución empleado. En esta investigación se simula dos escenarios de desastre sísmico donde se diseñan unas ventanas de tiempo para un caso de estudio de logística humanitaria, lo que permite evaluar el comportamiento de dicha restricción de forma práctica y lógica. Se puede evidenciar que el tipo de ventana de tiempo (homogénea o aleatoria) afecta de manera significativa la función objetivo, en nuestro caso hace que el

tiempo de evacuación con ventanas de tiempo homogénea sea menor que el obtenido con aleatorias.

- El problema está diseñado para asignar clientes relacionando la capacidad con la demanda, aunque un albergue este cerca de un nodo, si la capacidad de este es inferior a la demanda del punto de encuentro no lo asigna y lo envía a otro albergue donde sí se cumpla con la demanda completa. Esto se puede evidenciar en los resultados al encontrar la asignación de puntos de encuentro a albergues lejanos, debido a la incapacidad del modelo de parcializar las demandas entre albergues más cercanos con holguras de capacidad.
- El algoritmo diseñado puede ser utilizado como una herramienta computacional para la toma de decisiones en la ocurrencia de un desastre sísmico, la cual permite la localización de albergues a ser abiertos para la atención de afectados y la construcción de las rutas optimas de evacuación desde puntos de encuentro previamente establecidos.

### 13.RECOMENDACIONES

- Incluir una condición de cumplimiento de las ventanas de tiempo como primer parámetro para la asignación de los clientes a los depósitos establecidos, debido a que actualmente la generación de las rutas se lleva a cabo teniendo como prioridad la asignación según el vecino más cercano, para identificar si de esta manera se pueden obtener mejores resultados.
- En trabajos futuros adaptar la función objetivo del modelo con el propósito de poder ser utilizada para evaluar las instancias del VRPTW y del CLRP, en el caso donde no se hayan generado aun las instancias para el LRPTW; Además de poder evaluar tanto problemas de logística humanitaria, como de logística comercial.
- Generación de instancias para un LRPTW, con el fin de tener una referencia para la validación de un algoritmo a este problema.
- Complementar el caso estudiado para diferentes tipos de clientes (puntos de encuentro, hospitales, albergues, puntos de distribución) y evaluar posibles ampliaciones en la red de transporte, para ser incluidos en el modelo descrito.
- Se recomienda tener en cuenta un porcentaje de utilización mínimo para la habilitación de albergues, dividiendo la demanda de los puntos de encuentro que no cumplen con la restricción, entre albergues con holgura de capacidad.
- Generación de ventanas de tiempo para un enfoque de logística humanitaria, que puedan ser usadas en cualquier caso estudio y sirva para la simulación de escenarios de la vida real.

- El código de programación del algoritmo queda como una herramienta computacional para la toma de decisiones en ocurrencia de desastres sísmicos, además queda abierto al usuario para que sea tomado como base en el desarrollo de otros métodos más eficiente o modificaciones que permitan reducir el tiempo computacional en la determinación de soluciones.
- Incentivar la ejecución de proyectos de grado que aborden investigaciones relacionadas con problemas de localización-ruteo y sus variantes, usando otros métodos evolutivos para la solución.
- Se deja evidencia teórica y práctica del uso de ventanas de tiempo en problemas de localización-ruteo, como punto de partida para futuras investigaciones a nivel de posgrado y pregrado para la línea de investigación de optimización de sistemas logísticos del grupo OPALO.

## BIBLIOGRAFÍA

A. AFSHAR and A. HAGHANI. Modeling integrated supply chain logistics in real-time large-scale disaster relief operations. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2012. vol. 46. No.4. p. 327–338.

AHMADI, Morteza and SEIFI, Abbas. A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district. En: Elsevier. *Transportation Research Part E*. 2015. Vol.75. p. 145.

APTE, Aruna. *Humanitarian Logistics: A New Field of Research and Action*. Now publishers. 2010. Vol. 3, No. 1. p. 1-100.

BALCIK, B., BEAMON, B. M., & SMILOWITZ, K. Last mile distribution in humanitarian relief. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2008. Vol.12(2). p. 51–63.

BALCIK, B., BEAMON, BM. y SMILOWITZ, K. Last mile distribution in humanitarian relief. *J Intell Trans Syst*. 2008. Vol.12. p.51–63.

BANCO MUNDIAL. *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas*. Bogotá, Colombia. 2012. Primera edición. p. 11-72.

BERRETTA R, et al. Enhancing the performance of memetic algorithms by using a matching-based recombination algorithm: Results on the number partitioning problem. 2003. Kluwer Academic Publishers, Boston MA. p.65–90.

BLUM, Christian y ROLI, Andrea. Metaheuristic in combinatorial Optimization: Overview and conceptual comparison. En: *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2008. Vol. 35, no. 3, pag. 268.

BLUM, Christian y ROLI, Andrea. Metaheuristic in combinatorial Optimization: Overview and conceptual comparison. En: *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2008. Vol. 35, no. 3, pag. 268.

BOVENTER, E. The relationship between transportation costs and location rent in transportation problems. *Journal of Regional Science*. 1961. Vol.3. No.2. .

- BOZORGI-AMIRI, A. & KHORSI, M. A dynamic multi-objective location-routing model for relief logistics planning under uncertainty on demand, travel times and cost parameters. *Int J Adv Manuf Technol*. 2016. Vol.85. p.1633.
- CAUNHYE, Aakil; NIE, Xiaofeng y POKHAREL, Shaligram. Optimization models in emergency logistics: A literature review. En: *Socio-Economic Planning Sciences*. 2012. vol. 46, no. 1, p. 4-13.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). Información para la gestión de riesgo de desastres. Estudio de caso de cinco países: Colombia. México. 2007, pág. 29-30.
- CEPAL. El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: documento metodológico básico para estudios nacionales de caso. 2005. p. 6-26.
- CHAN, A. W., & FRANCIS, R. L. A Round-Trip Location Problem on a Tree Graph. *Transportation Science*.1976. Vol.10. No.1.
- CHAN, A. W., & HEARN, D. W. A Rectilinear Distance Round-Trip Location Problem. *Transportation Science*. 1977. Vol.11. No.2.
- CHOU, Ta-Yuan, et al. Multiobjective dynamic length genetic algorithm to solve the emergency logistics problem. 2010.
- CLOPAD. Caracterización general del escenario del riesgo por sismo en Bucaramanga. 2011. P. 15—24.
- COTTA, Carlos. Una visión general de los algoritmos meméticos. University of Málaga, Madrid, España. [En línea] Disponible en: [<http://www.lcc.uma.es/~ccottap/papers/memeticos.pdf>].
- DREXL, Michael and SCHNEIDER, Michael. A survey of variants and extensions of the location-routing problem. *European Journal of Operational Research*. 2014. Disponible en: ELSEVIER. p.1-26.
- DUHAMEL, C., et al. A memetic approach for the capacitated location routing problem. In *International Workshop on Metaheuristics for Logistics and Vehicle Routing EU/Meeting*. 2008. .
- Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja. Informe Mundial sobre Desastres 2010. p. 1-10.

- FOGEL, Lawrence. Autonomous Automata. En: Industrial Research. 1962. Vol.4, Ed. 2. p.14-19.
- GESTAL, Marcos, et al. Introducción a los algoritmos genéticos y la programación genética. Universidad da Coruña. 2010. No.140. p.50-60.
- GOERIGK, M., et al. A comprehensive evacuation planning model and genetic solution algorithm. Transportation Research Part E. 2014. Vol.71. p.82–97.
- GOLDBERG, D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley, Reading. 1989.
- HAGHANI, A., AND OH, S.C. “Formulation and solution of a multi-commodity, multi-modal network flow model for disaster relief operations. Transportation Research. 1996. Vol. 30, No. 3. p. 231–250. .
- HAMALAINEN, Wilhemiina. Class NP, NP-complete, and NP-hard problems. [en línea]. (2006). [Consultado 4 May. 2016]. Disponible en: [<http://cs.joensuu.fi/pages/whamalai/daa/npsession.pdf>]. .
- HERNÁNDEZ, Angie y BARRERA, Andrés. Un algoritmo evolutivo para el problema de distribución de recursos post-desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2016.
- JOVEL, Roberto. Los desastres naturales y su incidencia económico-social, en Revista de la CEPAL. 1989. Santiago de Chile. No.38.
- KARAOGLAN, I. AND ALTIPARMAK, F. A memetic algorithm for the capacitated location-routing problem with mixed backhauls. Computers & Operations Research. 2015. Vol.55. p. 200–216.
- LAPORTE, Gilbert. The vehicle routing problem. An overview of exact and approximate algorithm. En: European Journal of Operational Research. 1992. vol. 59, p. 345.
- LIN Y-H, BATTAR, ROGERSON PA, BLATT A, FLANIGAN M. A logistics model for emergency supply of critical items in the aftermath of a disaster. Socio-economic Plan Sci. 2011. Vol.45(4). p.132–45.
- MALDONADO, Esperanza y CHIO, Gustavo. Vulnerabilidad sísmica indicativa del municipio de Bucaramanga. Ciudad Digital- Universidad Industrial de Santander. 2002. No. 66.

MALDONADO, Esperanza, y CHIO, Gustavo. Identificación de las zonas sísmicas más vulnerables de la ciudad de Bucaramanga. UIS. Revista de la facultad de ingenierías Fisicomecánicas. 2005. Vol. 4. No.2 p. 99-116. .

MANOPINIWES, Wapee y IROHARA, Takashi. A Review of Relief Supply Chain Optimization. En: Sophia University. Japan.2014. Vol. 13, No. 1. p. 1-14.

MARANZANA, F. E. On the location of supply points to minimize transportation costs. Operational Research Quarterly. 1964. Vol.15. No.3.

MAREK L. A note on robustness tolerances for combinatorial optimization problems. Information Processing Letters. Vol. 110. 2010. p.725-729.

MATEOS, Alfonso. Algoritmos evolutivos y algoritmos genéticos. Trabajo para la Universidad Carlos III de Madrid. p.1-14. .

MIN, Hokey et al. Artificial intelligence in supply chain management: Theory and applications. International Journal of Logistics. 1998. Vol. 13. No.1. p.13-39.

NAGY, G., AND SALHI, S. Location-routing: Issues, models and methods. European Journal of Operational Research. 2007. Vol.177(2). p. 649–672.

NIKBAKSH, E. & ZANJIRANI FARAHANI, R. Logistics Operations and Management. Humanitarian logistics planning in disaster relief operations. p.312-315.

OR, I., & PIERSKALLA, W. P. A Transportation Location-Allocation Model for Regional Blood Banking. 1979. Vol.11. No.2. .

ORTIZ, Pablo. Propuesta de planificación de contingencias para la reducción del riesgo de desastres en el centro metropolitano de concepción. En: Universidad del Bío-bío, Chile. 2014.

OZDAMAR, L., EKINZI, E., & KUCUKYAZICI, B. Emergency logistics planning in natural disasters. Annals of Operations Research. 2004. No.129. p. 217–245.

PRINS, C., PRODHON, C., and WOLER CALVO, R. A memetic algorithm with population management (MAjPM) for the capacitated location-routing problem. EvoCOP. 2006. Vol. 3906. p.183-194. .

PRODHON, CAROLINE. [sitio web]. Francia: Instancias de Prohon para el LRP. [Consulta: 20 septiembre 2016]. Disponible en: [http://prodhonc.free.fr/Instances/instances\\_us.htm](http://prodhonc.free.fr/Instances/instances_us.htm).

- REYES, Lorena. Localización de instalaciones y ruteo de personal especializado en logística humanitaria post-desastre. caso inundaciones. En: Universidad de la Sabana, Chía. 2015.
- SAFEER, M, et al. Analyzing transportation and distribution in emergency humanitarian logistics. En: Elsevier science Ltd. 2014. vol. 97, p.2248—2258.
- SALCEDO, Elkin. Estudio de sismicidad histórica en la región de Bucaramanga (Colombia). Rev Acad. Colombia. Ciencia. 1999.
- SALHI, S., & RAND, G. K. The effect of ignoring routes when locating depots. European Journal of Operational Research. 1989. Vol.39. No.2.
- SALMERON, J., & APTE, A. Stochastic optimization for natural disaster asset prepositioning. Forthcoming, Production and Operations Management. 2010.
- SHOUYING, Li and HUIJUAN, Zhou. Optimization model of fuzzy location-routing problem of victim search in flood disaster. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. 2014. Vol.6. No.6. p.2080-208.
- Sociedad Nacional de La Cruz Roja Colombiana. Manual Nacional para el manejo de Albergues Temporales. 2008. p. 17-30. .
- SOLOMON, Marius and DESROSIERS, Jacques. Time window constrained Routing and Scheduling Problems. 2016.
- SONG, R., HE, S. y ZHANG, L. Optimum Transit Operations during the Emergency Evacuations, Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. 2009. vol. 9, p. 154-160.
- TIAN, J.; MA, W.Z.; WANG, Y.L.; WANG, K.L. Emergency supplies distributing and vehicle routes programming based on particle swarm optimization. Syst. Eng. Theory Pract. 2011. Vol.31. p.898—906.
- UKKUSURI S.V. and YUSHIMITO W.F. Location Routing Approach for the Humanitarian Prepositioning Problem. Journal of the Transportation Research Board. Washington, D.C. 2008. No. 2089. pp. 18-25. .
- UKKUSURI, S. V., & YUSHIMITO, W. F. A methodology to assess the criticality of highway transportation networks. J. Transp. Secur. 2009. Vol.2(1-2). p. 29—46.

WANG, Shaoren; MA, Zujun y ZHUANG, Bochao. Fuzzy location-routing problem for emergency logistics systems. *Computer modeling & New technologies*. 2014. Vol.18. No.2. p. 265-273.

WISINEE, Wisetjindawat, et. al. Integrating a Stochastic Failure of the Road Network and a Road Recovery Strategy into the Planning of Goods Distribution in the Aftermath of a Large-Scale Earthquake. 2015.

YI, W., & OZDAMAR, L. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities. *European Journal of Operational Research*. 2007. No 179. p.1177-1193.

YI, W.; KUMAR, A. Ant colony optimization for disaster relief operations. *Transp. Res. Part E: Logist. Transp. Rev.* 2007. Vol.43. p.660–672.

ZHANG, Qian, et al. Research on Location Routing Problem (LRP) Based on Chaos Search (CS) and Empirical Analysis. *American Journal of Operations Research*. 2013. Vol.3. No.1. p.1-6.

ZHU, Lan, et al. Solving the LRPTW based on tabu search algorithm. En: *Conference: 2014 International Conference of Logistics Engineering and Management*, 2014, p. 2-4.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A. PLANES LOCALES DE EMERGENCIA**

#### **1. BUCARAMANGA**

##### **1.1 DESCRIPCIÓN**

La estrategia Municipal para la respuesta a emergencias, es el marco de actuación de las entidades del sistema Municipal de Gestión del Riesgo para la reacción y atención de emergencias. Se refiere a todos los aspectos que deben activarse por las entidades en forma individual y colectiva con el propósito de ejecutar la respuesta a emergencias de manera oportuna y efectiva.

##### **1.1.1 SISTEMA MUNICIPAL PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES**

Que el Municipio de Bucaramanga adopto la política de Gestión del Riesgo de Desastre y que para su funcionabilidad y aplicabilidad se establece el Sistema Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres, en adelante, y para todos los efectos, sistema Municipal, como el conjunto de entidades públicas, privadas y comunitarias, de políticas, normas, procesos, recursos, planes, estrategias, instrumentos, mecanismos, así como la información atinente a la temática, que se aplica de manera organizada para garantizar la gestión del riesgo en el Municipio, y que estará representado como se ve en le figura ....

**Figura. Organigrama funcional del sistema municipal para la gestión del riesgo de desastres**



## 1.2 CONTEXTO MUNICIPIO

Se hace una descripción detallada del municipio y se muestran características de este como: área, temperatura promedio relieve, fenómenos amenazantes, vías de acceso, red vial entorno, tamaño de la población entre otros. También se muestran las empresas prestadoras de servicios públicos, de comunicación y de salud, así como también las empresas que componen el CMGRD.

## 1.3 ANÁLISIS GENERAL DE LA AMENAZA

Para la elaboración del Panorama de Amenazas, se surtió un proceso de varias etapas que implicó la caracterización del municipio de Bucaramanga, determinando las principales amenazas que se presentan en la ciudad. Desde esta óptica, se aprecia la real situación municipal, así como la percepción de los diversos actores involucrados que facilitan la ejecución de un trabajo mancomunado: sensibilizar, concientizar y empoderar sobre los

peligros inminentes a los que todas y todos los pobladores de Bucaramanga están expuestos. Se desarrolló en las fases de: Recolección de información, Identificación de amenazas (ver figura 2) y calificación del nivel de amenaza (ver figura 3)

Figura 2. Identificación de fenómenos amenazantes.

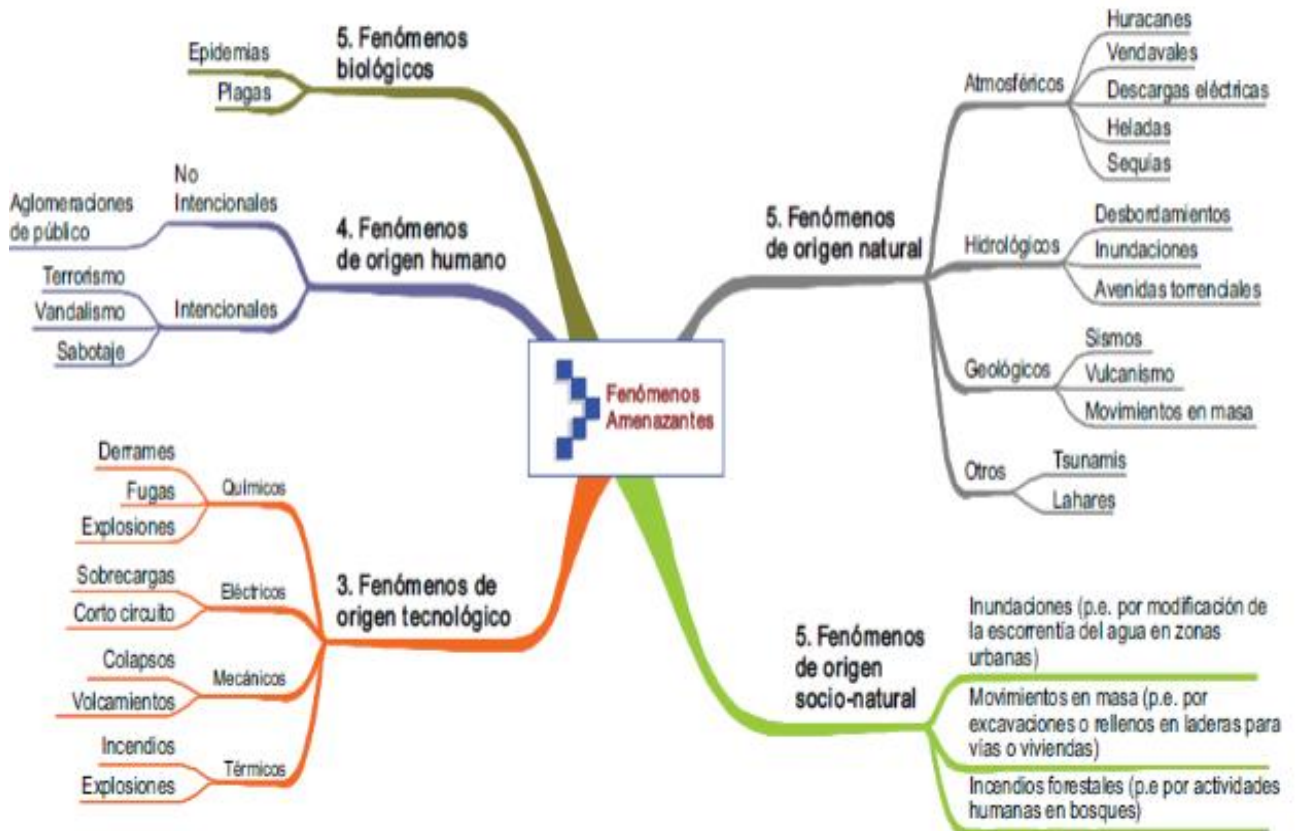


Figura 3. Calificación del nivel de amenaza (Valoración por riesgos naturales)

AMENAZA ALTA	
AMENAZA MEDIA	
AMENAZA BAJA	
ZONA SIN AMENAZA ESTABLECIDA	

## **1.4 INVENTARIOS**

En Bucaramanga se cuenta con diferentes recursos para atender todas las etapas de un desastre, entre estos se encuentran:

- Organismos de socorro: Equipos de transporte, equipos varios, equipos de telecomunicaciones, camillas e inmovilizadores, equipos de protección personal, equipos de rescate e insumos.
- Sistema municipal de salud: Se tiene registro de la cantidad de personas prestadoras de servicio en los diferentes centros de salud, así como con los equipos que cuentan dichos centros (ambulancias, camillas, número de quirófanos, etc.).
- Centros educativos: Se tiene registro de inventarios de equipamientos educativos con su correspondiente dirección.

## **1.5 OPERATIVIDAD DE LA ESTRATEGIA PARA LA RESPUESTA A EMERGENCIAS**

La ley 1523 de 2012, Busca que la reducción del riesgo sea una prioridad nacional y local con una sólida base institucional, legal y financiera para su aplicación, y establece cuatro instrumentos de política para la gestión del riesgo, así:

- Un marco legal y normativo: Legislación para apoyar la reducción del riesgo a desastres.
- Instrumentos de gestión: La reducción del riesgo como parte de las políticas y planes, indicadores de gestión.
- Organización y Mecanismos de coordinación: Responsabilidades asignadas, esquemas de organización. (Plataformas / sistemas), descentralización de recursos.
- Mecanismos de financiación: Creación de fondos territoriales, presupuestos, seguros, bonos, y otros mecanismos de financiación.

## **1.6 SISTEMA ORGANIZACIONAL**

El sistema corresponde a la organización del CMGRD y las instituciones que lo conforman. El sistema consta de dos (2) componentes básicos: Centro Operativo de Emergencias (COE) y la estructura del Sistema Comando de Incidentes en la escena.

En campo hay un COMANDANTE DE INCIDENTE y de acuerdo a la complejidad del incidente es apoyado por un Staff el cual está conformado por tres (3) OFICIALES a saber: Seguridad, Información Pública y Enlace. Las secciones funcionales están a cargo de un JEFE, las Unidades de Trabajo están a cargo de un LIDER y las Ramas a cargo de un Coordinador.

Las secciones funcionales son:

- PLANIFICACIÓN
- OPERACIONES
- LOGÍSTICA
- ADMINISTRACIÓN Y FINANZAS

## **1.7 PLAN MAESTRO DE CONTINGENCIA PARA SISMO Y FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA**

Como no se cuenta con un análisis de vulnerabilidad física ni estructural específico por sector no se han podido realizar cálculos estimativos sobre la afectación a la población, es decir el número de personas que podrían estar afectadas y cuáles podrían ser sus necesidades específicas. La cantidad de barrios que están bajo amenaza de fenómenos de remoción en masa son muchos y por lo tanto lo referente al tema de evacuación (alarma, vías, rutas, puntos de reunión final, señalización) debe realizarse en un proyecto adicional a este por el detalle y tiempo que esto implica.

El Plan de Contingencia para sismo o fenómenos de remoción en masa fue realizado con base en un escenario de riesgo general lo cual encierra un alto nivel de incertidumbre en cuanto a los daños en personas, viviendas, edificios esenciales, vías, entre otros.

Por lo cual se hicieron las siguientes actividades:

Se determinaron los escenarios de riesgo para fenómenos de remoción en masa

- Se definió el Sistema de Alerta y Alarma
- Se determinó el Sistema de Organización para la Atención de la emergencia
- Se determinaron las necesidades en capacitación para el CLOPAD y Comunidad
- Determinar los inventarios para la atención de emergencias.

## **2. BOGOTÁ**

### **2.1 PROPOSITO**

El Plan de Emergencias de Bogotá (PEB) define las políticas, los sistemas de organización y los procedimientos generales aplicables para enfrentar de manera oportuna, eficiente y eficaz las situaciones de calamidad, desastre o emergencia que se presente en Bogotá, con el fin de mitigar o reducir los efectos negativos o lesivos sobre las personas, los bienes, la economía, el medio ambiente, y la infraestructura de la ciudad. Mediante un sistema estructurado de matrices, planes y protocolos provee disposiciones relativas a la clasificación de las emergencias, las funciones y actividades, responsables, procedimientos, organización, coordinación y recursos que son aplicables para la atención de emergencias.

### **2.2 ALCANCE**

El PEB es un instrumento que se desprende del Plan Distrital de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá (PDPAE) a través de la Estrategia de Fortalecimiento de la Capacidad de Respuesta de Bogotá ante un Sismo de Gran Magnitud, el cual agrupa los objetivos, actividades, instrumentos y productos aplicables para los preparativos y atención de emergencias en la ciudad. El PEB es uno de los productos asociados al primer objetivo del proyecto que se refiere al Fortalecimiento de las Operaciones de Emergencia. En este contexto el PEB se circunscribe únicamente al ámbito de la organización para la respuesta a emergencias. Aspectos tales como capacitación de grupos operativos, formación ciudadana y recuperación, entre otros, son abordados en desarrollo de otros objetivos de la Estrategia en mención.

### **2.3 PREPARATIVOS PARA EMERGENCIAS**

El Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá D.C. (FOPAE), con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), formuló una “Estrategia de Fortalecimiento de la Capacidad de Respuesta de Bogotá ante un Sismo de Gran Magnitud”, que define el marco conceptual e institucional para fortalecer la capacidad de respuesta del Distrito, la población en general, y estrechar sus vínculos en este tema con la administración del Departamento de Cundinamarca y de los municipios vecinos a Bogotá, el Gobierno Nacional, el Sistema de las Naciones Unidas en Colombia y las organizaciones de cooperación internacional.

El programa se ha planteado como meta, el desarrollo de estrategias y acciones de intervención en lo operacional, organizacional, normativo, educativo, financiero y logístico para el fortalecimiento de la capacidad de respuesta y recuperación de Bogotá ante un sismo de gran magnitud, preparando a los diferentes actores institucionales y comunitarios que intervendrían en la respuesta ante este evento y fortaleciendo la relación del Sistema Distrital de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá con los Sistemas Departamental, Nacional, de la Cooperación Internacional y la comunidad en general, en el marco de una cultura ciudadana de la prevención.

Para dar cumplimiento a esta meta se han establecido cuatro objetivos inmediatos que abarcan:

- El fortalecimiento de las operaciones de emergencia: Sistemas organizacionales, sistema logístico, sistema de capacitación y sistema de comunicación.
- El apoyo a las operaciones de emergencia: Escenario de daños, sistemas de información, normatividad y gestión interinstitucional.

- El desarrollo de las capacidades ciudadanas: Información pública y conciencia ciudadana, y rehabilitación, reconstrucción y desarrollo sostenible.
- La recuperación y rehabilitación.

## **2.4 ATENCIÓN DE EMERGENCIAS**

Con el objetivo de activar y organizar la respuesta a emergencias, se utilizan dos clasificaciones: la primera en relación con el tipo de incidentes que pueden ser reportados por la población a través del número único de emergencias (NUSE 123) y en la segunda se clasifican las emergencias propiamente dichas en función de su “magnitud”.

Clasificación de emergencias: Busca guiar la primera respuesta y facilitar la organización rápida de las entidades operativas del SDPAE. Mediante una escala ascendente de 5 niveles se busca comunicar acerca de la magnitud y complejidad de la emergencia en curso. Como se observa en la figura 4, la clasificación se hace con base en 8 criterios relacionados con la capacidad de respuesta del Distrito y el impacto de la emergencia.

**Figura 4. Magnitud y complejidad de la emergencia el curso según el nivel.**

	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	NIVEL 4	NIVEL 5
Capacidad Operativa y Técnica del Distrito	SUFICIENTES	SUFICIENTES	SUFICIENTES	Suficiente con eventual apoyo externo específico	Insuficiente requiere apoyo nacional e internacional
LOGÍSTICA	Institucional	Institucional y eventual apoyo de FOPAE	FOPAE e institucional	Distrital y eventualmente Nacional	Distrital, nacional e internacional
AFECTACIÓN GEOGRÁFICA	PUNTUAL	PUNTUAL	UN ÁREA O VARIOS PUNTOS	UN AREA O VARIAS ZONAS	UN AREA O VARIAS ZONAS
AFECTACIÓN FUNCIONAL	NO	NO	Afectación Total en Zona de Impacto	Afectación Total varias Zona de Impacto	Afectación Total o Parcial de la Ciudad
AFECTACIÓN POBLACIÓN	MÍNIMA	MÍNIMA	MEDIA	ALTA	ALTA
GOVERNABILIDAD	NO	NO	Socialmente visible	Posibilidades de crisis en algún sector de la ciudad	Dificultades de Gobernabilidad en algunos sectores de la Ciudad
EXPANSIÓN RIESGO	NO	NO	PUEDA O NO SER EXPANDIBLE	EXPANDIBLE CONTROL COMPLEJO	EXPANDIBLE CONTROL COMPLEJO
PERIODO OPERACIONAL	Menor a 8 Horas	Menor a 8 horas	Mayor a 8 Horas	Mayor o Igual a 48 Horas	Mayor o Igual a 72 Horas

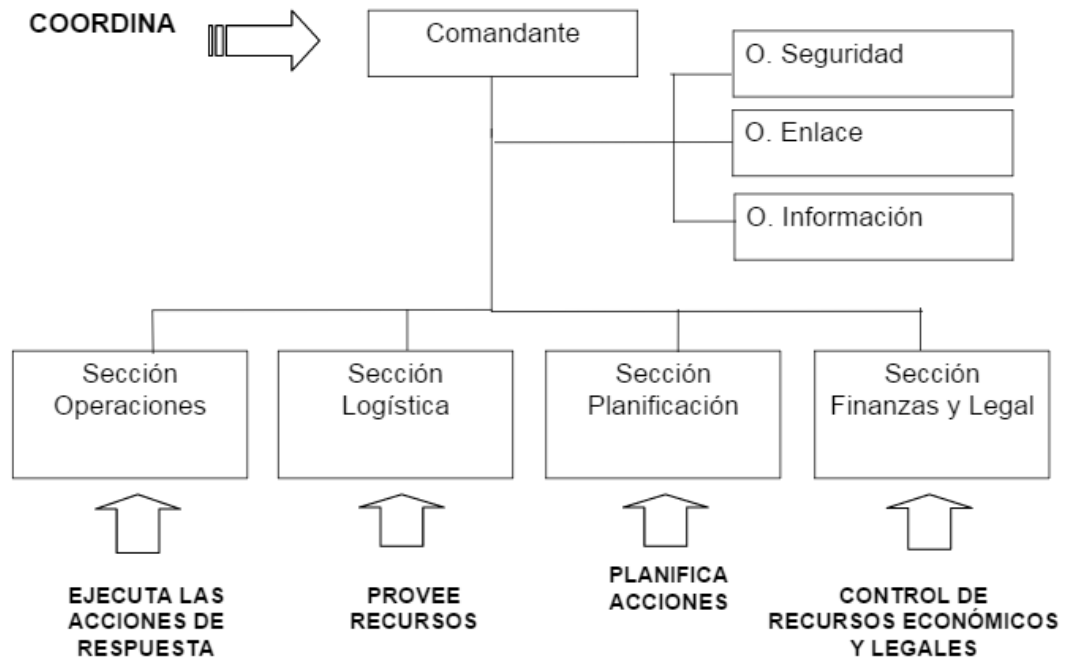
## 2.5 MODELO ORGANIZACIONAL

En este numeral se presenta el modelo de organización, coordinación y toma de decisión para el logro eficiente y eficaz del control de las emergencias con las capacidades y recursos disponibles de las entidades e instancias responsables y la participación del sector privado y la comunidad. Se basa en el Sistema Comando de Incidentes.

Sistema de comando y coordinación: En la figura 5 se presenta la estructura general para la administración de las emergencias. Como se puede observar consiste de un comando único, cuatro secciones principales (operación, logística, planificación, finanzas y asuntos legales) y tres oficiales (seguridad, enlace e información). Este sistema busca mantener el alcance de control (número máximo

de instancias de coordinación que una sección puede manejar eficientemente) y se puede contraer o expandir en función del nivel de la emergencia.

**Figura 5. Modelo organizacional.**



## 2.6 ÁREAS Y FUNCIONES DE RESPUESTA

Se definen y organizan, a través de áreas y funciones, las acciones propiamente dichas de respuesta a las emergencias y se asignan entidades responsables y de apoyo según las competencias institucionales como se ve en la figura 6.

Figura 6. Área de respuesta y responsable principal.

No.	ÁREA DE RESPUESTA	RESPONSABLE PRINCIPAL
1	Atención Social	Secretaria Distrital de Integración Social - SDIS
2	Sistemas Generales, Hábitat y Medio Ambiente	FOPAE, Secretaria Distrital de Planeación y Secretaria Distrital de Ambiente
3	Servicios de Emergencia	FOPAE
4	Salud	SDS
5	Administración de la Emergencia	FoPAE
6	Gobernabilidad	Secretaria de Gobierno - FOPAE

## 2.7 IMPLEMENTACIÓN, ACTIVACIÓN Y CONTROL DEL PLAN

La activación del Plan puede derivarse de la ocurrencia de una emergencia o situación de inminencia. En el primer caso la primera respuesta a llamados de emergencia o auxilio se realiza según los protocolos de Recepción y Despacho del NUSE 123.

Dependiendo del número de entidades requeridas para la atención de la emergencia la activación es parcial o total. En el primer caso no se activan todas las Áreas y/o funciones. En el segundo caso se activa la totalidad de entidades relacionadas en las matrices de responsabilidades. La figura 7 resume las instancias y niveles de activación.

Figura 7. Instancias y niveles de activación.

<b>NIVEL DE LA EMERGENCIA</b>	<b>DEPENDENCIAS</b>	<b>INSTANCIA DE COORDINACIÓN</b>	<b>NOTIFICACIÓN</b>	<b>TIPO DE ACTIVACIÓN</b>
<b>PRIMERA RESPUESTA</b>	- NUSE - FOPAE	Sala de recepción NUSE	Según protocolos de recepción y Despacho NUSE	
<b>NIVELES 1 Y 2</b>	Entidades respondientes	- PMU en zona de impacto	Según protocolos Distritales e institucionales	
<b>NIVEL 3</b>	-SDPAE	- PMU o COE según valoración	Según Áreas y funciones del PEB	Parcial o total según valoración del FOPAE
<b>NIVEL 4</b>	-SDPAE	- PMU y COE	Según Áreas y funciones del PEB	Activación total con eventual participación de instancias nacionales
<b>NIVEL 5</b>	-SDPAE -SNPAD -NACIONES UNIDAS	PMU y COE	Según Plan de Emergencia de Bogotá (PEB)  Protocolos de respuesta ante un evento mayor del Nivel Nacional  Protocolos del Sistema de Naciones Unidas	Activación Total del SDPAE, SNPAD y cooperación internacional

### **3. TONA, SANTANDER**

#### **3.1 CARACTERIZACIÓN**

Se hace una descripción detallada del municipio y se muestran características de este como: área, localización, temperatura promedio relieve, fenómenos amenazantes, vías de acceso, red vial entorno, tamaño de la población entre otros.

#### **3.2 IDENTIFICACIÓN DE ESCENARIOS DE RIESGO**

Amenazantes:

- Fenómenos de origen hidrometereológico: Riesgo por inundaciones.
- Fenómenos de origen geológico: Riesgo por sismos y riesgo por remoción de masa.

#### **3.3 ELEMENTOS EN CARACTERIZACION DEL ESCENARIO DE UN RIESGO**

Se tiene caracterización general en donde se incluye:

- Descripción del fenómeno amenazante.
- Causas del fenómeno amenazante.
- Factores que favorecen la condición de la amenaza.
- Actores significativos en la condición de amenaza.

De allí se parte para mirar los elementos de asociados a la amenaza:

- Elementos expuestos y vulnerabilidad: Incidencia de la locación, incidencia de las condiciones socio económica de la población expuesta e incidencia de las prácticas culturales.

- Daños y/o pérdidas que pueden presentarse: En las personas, en bienes materiales particulares, colectivos y de producción.
- Crisis social asociada con los daños estimados: Desplazamiento, afectación de núcleos familiares, Dependencias económicas con el estado, etc.
- Medidas e intervención: Campañas de sensibilización, simulacros, etc.

Análisis a futuro: Interacción entre amenaza y vulnerabilidad, posibilidades de reducción de uno o los dos factores y la evolución.

### 3.4 MEDIDAS DE REDUCCIÓN DEL RIESGO

Medidas de reducción del riesgo – Intervención correctiva.		
	<b>Medidas estructurales</b>	<b>Medidas no estructurales</b>
Medidas de reducción de la amenaza:	Reubicación.	Simulacros.
Medidas de reducción de la vulnerabilidad	Reforzamiento estructural de las edificaciones. Construcciones con parámetros de la normativa sismo resistentes.	Sistema de alertas
Medidas de efecto conjunto sobre amenaza vulnerabilidad	Adecuación y estabilización de vías.	Capacitación en qué hacer en caso de un sismo.

### **3.5 PLANES Y ACCIONES**

Organizar acciones detalladas necesarias en condiciones de riesgo, así como la identificación, Especificación y diseño de las medidas de intervención destinadas a prevenir, reducir el riesgo, a la preparación para el manejo del desastre y la protección financiera del Municipio de Tona, con el apoyo de las entidades municipales, departamentales, nacionales y de la cooperación internacional.

Programa y acciones

#### **1. RIESGO POR SISMICIDAD**

1.1 Planes familiares de emergencias

1.2 Plan comunal de emergencia

1.3 Plan escolar de emergencia

1.4 Simulacros emergencias

1.5 Sistema de alarmas

En la figura 8 se muestra un ejemplo de como se trata un plan, en este caso el plan escolar de emergencia.

Figura 8. Ejemplo del plan escolar de emergencia.

<b>ACCIÓN PLAN ESCOLAR DE EMERGENCIA</b>		
<b>1. OBJETIVOS</b>		
Conformar el Comité Escolar de Gestión del Riesgo de Desastre, CEGRD. y dotarlos de señalización, botiquín, camilla y extintores.		
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA y/o JUSTIFICACIÓN</b>		
En la dinámica de la evolución de la tierra, la necesidad de adaptación al cambio climático, la gestión ambiental y la gestión del riesgo, hace necesario el posicionamiento de una nueva cultura encaminada a lograr el equilibrio entre el ser humano y la naturaleza, entonces se estima que un multiplicador potencial de este cambio cultural son los estudiantes.		
<b>3. DESCRIPCIÓN DE LA ACCIÓN</b>		
Desarrollar la herramienta Plan Escolar de Gestión del Riesgo, capacitar certificadamente a un grupo brigadista y dotarlos de elementos básicos, elaborar el plan de contingencia, el plan de evacuación y crear un documento en el que la institución educativa establece el conjunto de objetivos, políticas y líneas de acción para indagar, reflexionar e intervenir las causas del riesgo que afectan la escuela con el fin de reducirlas o eliminarlas hasta donde sea posible; incluye también la preparación para respuesta a emergencias o desastres y la recuperación después del evento.		
<b>3.1. Escenario(s) de riesgo en el cual interviene la acción:</b> Riesgo por sismo	<b>3.2. Procesos y subproceso de la Gestión del Riesgo al cual pertenece la acción:</b> Reducción del Riesgo-intervención prospectiva	
<b>3. APLICACIÓN DE LA MEDIDA</b>		
<b>4.1. Población Objetivo:</b> 1443 estudiantes	<b>4.2. Lugar de aplicación:</b> planteles educativos	<b>4.3. Plazo (periodo en años)</b> tres (3) años
<b>4. RESPONSABLES</b>		
<b>5.1. Entidad, institución u organización ejecutora:</b> Alcaldía de Tona –		
<b>5.2. Coordinación interinstitucional requerida:</b>		
CMGRD de Tona		
<b>5. PRODUCTOS Y RESULTADOS ESPERADOS</b>		
Multiplicar el propósito de cambio de cultura por la gestión del riesgo.		
<b>6. INDICADORES</b>		
Reducir la vulnerabilidad sísmica en un 20%, en el Municipio de Tona.		
<b>7. COSTO ESTIMADO</b>		
Cinco millones de pesos (5.000.000)		

## **4. CHILE**

### **4.1 METODOLOGÍA DE GESTIÓN**

La gestión nacional en Protección Civil debe estar sustentada en el desarrollo adecuado de la identificación de riesgos y de recursos de una unidad geográfica. Este proceso se basa en cinco elementos que comprenden una metodología base para el análisis de la realidad, que además considera una permanente retroalimentación.

Esta metodología debe considerar, a lo menos, las siguientes acciones:

- Análisis Histórico
- Investigación Empírica (Técnica, Científica, Económica, en terreno, etc.)
- Discusión (Para priorizar participativamente las amenazas, vulnerabilidades y recursos)
- Elaboración de Mapas y Cartografías, (identificando Riesgos y Recursos para Prevención y Respuesta)

Planificación Integral en Protección Civil.

### **4.2 GESTIÓN PARTICIPATIVA**

En el Marco de la Gestión Integral en Protección Civil, la participación y compromiso de la sociedad en su conjunto, deben constituir una estrategia clave a considerar en los distintos programas de trabajo.

Se debe ir gradualmente motivando un compromiso nacional de autoprotección, por medio de una metodología interactiva y participativa en todos y cada uno de los niveles político-administrativos, como un reconocimiento expreso a la capacidad de las personas para ser partícipes en la generación de sus propios procesos de desarrollo.

La percepción de la gente del riesgo o peligro en su entorno, de los recursos de que dispone para enfrentarlo, deben ser fuente de información sustantiva a considerar en la gestión de Protección civil, la que, sumada a los antecedentes validados aportados por el ámbito científico-técnico, servirán de base diagnóstica para la planificación de acuerdo a las específicas realidades locales.

### **4.3 PLANIFICACIÓN ACCEDER PARA EL MANEJO DE EMERGENCIAS Y DESASTRES**

ACCEDER es una Metodología simple, de fácil manejo, estructurada en una sola hoja, destinada a elaborar una planificación para situaciones de emergencia local, considerando los principios de AYUDA MUTUA y USO ESCALONADO DE RECURSOS, que sustentan al Sistema de Protección Civil, a partir de una adecuada coordinación.

La metodología cubre por etapas, las acciones y medidas fundamentales a tener en cuenta en la acción de respuesta, como son: Alarma, Comunicaciones, Coordinación, Evaluación Primaria o Preliminar, Decisiones, Evaluación Secundaria y la Readecuación del Plan, con lo que se conforma el acróstico ACCEDER.

Al estructurar un plan de respuesta, el comité de protección civil, debe tener presente los siguientes elementos:

- Alarma: Ocurrido un evento destructivo, éste debe ser de conocimiento de un organismo o institución responsable de atender ese tipo de situaciones. Mientras no se reciba el aviso correspondiente, no existe ninguna posibilidad de dar respuesta oportuna.
- Comunicación e Información: El plan debe reflejar claramente las relaciones de comunicaciones entre los organismos y servicios involucrados. Esta

cadena de comunicación se inicia con el organismo que recibe la alarma y comienza a extenderse a los servicios de respuesta primaria.

- **Coordinación:** La coordinación es la armonía entre los elementos y acciones que se conjugan en una determinada situación, en función de un mismo objetivo. Supone trabajar en acuerdo, lo que resulta indispensable para controlar una situación de emergencia.
- **Evaluación (Preliminar o Primaria):** En esta fase se debe establecer una valoración de las consecuencias producidas por la emergencia. Constituye una tarea destinada a objetivar las reales dimensiones del problema.
- **Decisiones:** De acuerdo a los daños y, a las respectivas necesidades evaluadas, el mando conjunto adoptará las decisiones de atención y normalización de la situación en el menor plazo posible.
- **Evaluación (Secundaria o Complementaria):** La evaluación secundaria o complementaria, tiene por objetivo contar con antecedentes más acabados sobre las repercusiones del evento destructivo que afectó o aún se encuentra afectando un área determinada.
- **Readecuación (Reformulación de Planes):** Esta fase, a cargo del Comité de Protección Civil, permite un recordatorio de la importancia de aprovechar la experiencia, partiéndose del convencimiento que no existe, por muchas similitudes puntuales que se observen, ninguna emergencia igual a otra.

#### **4.4 PROCEDIMIENTOS NORMALIZADOS DE EMERGENCIA**

De acuerdo al tipo de emergencia o desastre, el Sistema de Protección Civil se activa de acuerdo a los siguientes procedimientos:

- Activación y alerta.
- Evaluación operacional.
- Desactivación y Evaluación.

Estos tres procedimientos son los mismos para cuando se presente un evento destructivo de manifestación lenta o súbita. Solo cambia en las actividades que se realizan en ellas y en las tareas delegadas para el manejo de cada uno de estos dos.

#### **4.5 FLUJOS E INFORMES DE EMERGENCIA**

Flujos de Información de Emergencia: La administración de emergencias y desastres implica la solución de situaciones complejas, lo que necesariamente obliga a que las autoridades cuenten con la mejor información posible, de forma tal, que permita cumplir con las tareas de respuesta y restablecimiento de la normalidad, oportuna y coordinadamente, como también informar verazmente a la población.

Los Informes de Emergencia, en la medida que lo permita la claridad y consistencia de la información disponible, debe ser:

**OPORTUNO:** entregado a tiempo y sin demoras innecesarias.

**CONCISO:** breve en el modo de explicar los hechos.

**CONFIABLE:** coincidir en lo esencial de su contenido con la misma información que pueda recibirse desde otras fuentes.

## 5. BOLIVIA

### 5.1 MARCO DE REFERENCIA

Para la primera parte del programa de prevención de desastres, se hace un recuento de los desastres que han ocurrido en Bolivia.

- Estrategia del país en gestión de riesgos:

El marco legal recientemente desarrollado significa un paso adelante en la definición de una nueva organización institucional, con un enfoque en la implantación de reglas de juego modernas para la reducción de riesgos y el manejo de desastres. El marco legal aprobado en marzo de 2002, ha sido recientemente reglamentado, mediante Decreto Supremo No. 26739 de fecha 4 de Agosto del 2002, estableciéndose mecanismos de coordinación interinstitucional y atribuciones funcionales a los diferentes miembros del Sistema Nacional para la reducción de Riesgos y Atención de Desastres y/o Emergencias (SISRADE).

En el corto plazo, la estrategia del Gobierno en la gestión de riesgos, liderada por el Consejo Nacional para la Reducción de Riesgos y atención de desastres y/o emergencias (CONARADE), se sintetiza en poner a prueba la reglamentación recientemente aprobada a través de la elaboración e implantación de planes de prevención y atención de emergencias y mejorar el conocimiento de la temática entre actores involucrados en gestión de riesgos. Visto como una primera fase de implantación del nuevo marco legal e institucional, la estrategia de Gobierno sería complementada mediante evaluaciones que ayudarían a retroalimentar el proceso de fortalecimiento del SISRADE. Estas acciones se enmarcan dentro de la Estrategia Boliviana de Reducción de Pobreza (EBRP), en la que la gestión de riesgos forma parte del componente estratégico que busca “Aumentar la Seguridad y Protección de los Pobres”. Complementariamente, dado el impacto económico negativo que los

desastres tienen en la economía, el Gobierno identifica la prevención de desastres como una acción estratégica de mediano y largo plazo.

- La facilidad sectorial para la prevención de desastres: Esta tiene como objetivo reforzar los sistemas de prevención de desastres y manejo de riesgo. Dentro de las líneas de inversión propuestas en la facilidad sectorial, esta operación financiará actividades orientadas a la: (i) identificación y pronóstico de riesgos, con el fin de entender y cuantificar la vulnerabilidad y el riesgo de desastre al que se está expuesto, primordialmente a través de los planes de prevención y atención de emergencias; (ii) preparación, para mejorar la capacidad del país de atender rápida y eficazmente una emergencia y antes de las emergencias, primordialmente a través de las actividades de capacitación y divulgación; y (iii) creación de sistemas nacionales eficaces para la reducción de riesgos, producto del conjunto de actividades de la operación.

## **5.2 ESTRATEGIA DEL PROGRAMA**

Esta operación se basa en cuatro principios complementarios y necesarios para el logro del objetivo de la operación. Éstos son:

i. Gestión local de riesgos. La manifestación de los desastres tiene un carácter territorial definido. Para una adecuada implantación de medidas de prevención y atención, se requiere tener a nivel local un adecuado conocimiento de la situación de riesgos, de la definición de prioridades de inversión, de los mecanismos de coordinación con niveles nacionales y regionales.

ii. Integralidad. Gestión de riesgos es un concepto integral que va más allá de la atención a las emergencias. La estrategia de política pública debe

basarse en definir medidas de prevención en los programas de inversión, e introducir mecanismos eficaces para atender las situaciones de emergencia cuando éstas son inevitables.

iii. Multisectorialidad. Como principio de acción, se requiere asimilar la gestión de riesgos como una política de carácter multisectorial, buscando que en los diferentes sectores se internalicen líneas básicas de acción y se conozca la relación de gestión de riesgos y las responsabilidades sectoriales.

iv. Visión de largo plazo: Los resultados y/o impactos de la implantación de una política de prevención de desastres se aprecia mejor en el largo plazo. En este sentido, se requiere un compromiso político y social para invertir y mantener esquemas de gestión de riesgos que trascienden períodos críticos o emergentes en la atención a los desastres.

La estrategia de esta operación es dejar sentadas las bases operacionales para implantar los principios enunciados dentro de la gestión de riesgos de Bolivia. Como parte de una estrategia de largo plazo y producto de capacidades mejoradas, así como de un mayor conocimiento de los factores que inciden en la formación de desastres, se espera que ejecutada esta operación, Bolivia cuente con un esquema de gestión de riesgos que se vea reflejado en la política nacional de inversión pública.

### **5.3 SISTEMA NACIONAL PARA LA REDUCCIÓN DE RIESGOS Y ATENCIÓN DE DESASTRES Y/O EMERGENCIAS (SISRADE)**

Concepto: El Sistema Nacional para la Reducción de Riesgos y Atención de Desastres y/o Emergencias (SISRADE) es el conjunto orgánico y articulado de

estructuras, relaciones funcionales, métodos y procedimientos que establecen entre sí las entidades públicas, privadas y las organizaciones ciudadanas, así como los recursos físicos, técnicos, científicos, financieros y humanos de las entidades que lo conforman, en el cuál cada componente, desde el ámbito de su competencia y jurisdicción y en forma autónoma e interrelacionada busca el logro de los objetivos definidos en la presente Ley.

Objetivos: Los objetivos del SISRADE son: Prevenir y Reducir pérdidas humanas, económicas, físicas, culturales y ambientales generadas por Desastres y/o Emergencias, así como rehabilitar y reconstruir las zonas afectadas por estos a través de la interrelación de las partes que lo conforman, la definición de responsabilidades y funciones de estas y la integración de esfuerzos públicos y privados en el ámbito nacional, departamental y municipal, tanto en el área de la Reducción de Riesgos como en el área de la Atención de Desastres.

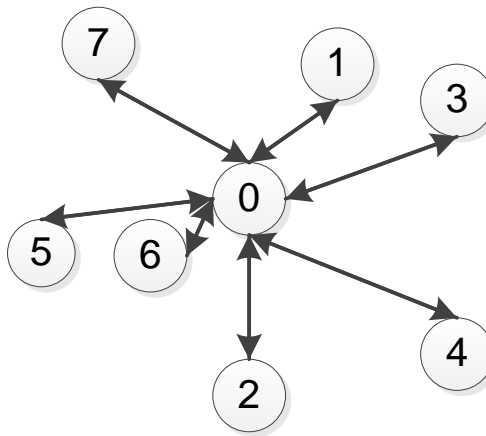
## ANEXO B.

### Ejemplo de la heurística del vecino más cercano

Para mostrar el desarrollo de un problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo con la heurística del vecino más cercano tomamos como datos iniciales valores aleatorios de las instancias de R101.10, R101.25, R101.100 propuestas por Solomon.

En la figura 1 se muestra la red de transporte conformada por los clientes (nodos) 1,2, 3, 4, 5, 6, 7 y el nodo depósito 0. La tabla 1 muestra las respectivas demandas, ubicaciones y ventanas de tiempo para cada cliente. La tabla 2 muestra la matriz de costos/distancias y por último la tabla 3 muestra las restricciones del problema.

Figura 1. Red de transporte del ejemplo.



Los límites inferior y superior de los intervalos se denominan  $a_i$  y  $b_i$  respectivamente:

$a_i$ : Conocido como el momento más temprano en el que el cliente puede ser visitado.

$b_i$ : el momento más lejano o tardío en el que el cliente puede recibir visitas.

El tiempo que tarda el servicio en el cliente  $i$ , se denomina  $s_i$ . El valor es constante para todos los clientes.

Tabla 1. Datos de entrada ejemplo.

Cliente	X	Y	Demanda	$a_i$	$b_i$	$s_i$
0	35	35	0	0	230	10
1	41	49	10	34	44	10
2	35	17	7	32	42	10
3	55	45	13	50	60	10
4	55	20	19	97	107	10
5	15	30	26	87	97	10
6	25	30	3	99	111	10
7	20	50	5	81	91	10

La matriz de distancias euclidianas se calcula usando las coordenadas geográficas  $x$  e  $y$  correspondientes a cada cliente. La columna de clientes de la izquierda son los nodos de partida y los nodos de llegada se encuentran en la fila superior.

Tabla 2. Matriz de distancias ejemplo.

	1	2	3	4	5	6	7	0
1	0	32,558	14,56	32,202	32,202	24,839	21,024	15,232
2	32,558	0	34,409	20,224	23,854	16,401	36,249	18
3	14,56	34,409	0	25	42,72	33,541	35,355	22,361
4	32,202	20,224	25	0	41,231	31,623	46,098	25
5	32,202	23,854	42,72	41,72	0	10	20,616	20,616
6	24,839	16,401	33,541	33,541	10	0	20,616	11,18
7	21,024	36,249	35,355	33,355	20,616	20,616	0	21,213
0	15,232	18	22,361	22,361	20,616	11,18	21,213	0

Capacidad de los vehículos **Q = 30**

Tabla 3. Restricciones del ejemplo.

<b>Restricción de Capacidad</b>	La suma de las demandas de los nodos que se van insertando a la ruta debe ser menor a 30 unidades, así es que cuando voy insertando un cliente le voy restando la demanda de ese cliente a la capacidad del vehículo.
<b>Restricción de Tiempo</b>	$a_i + s_i + t_{ij} \leq b_j$ <p>Si la suma del tiempo de viaje de i a j, la duración del servicio en i y el intervalo correspondiente al inicio de la ventana de tiempo en i superan el tiempo más tardío posible en el que el siguiente cliente j permite ser servido, no es posible insertarlo a la ruta.</p>

Para la construcción de un tour se llevan a cabo los pasos descritos en el diagrama:

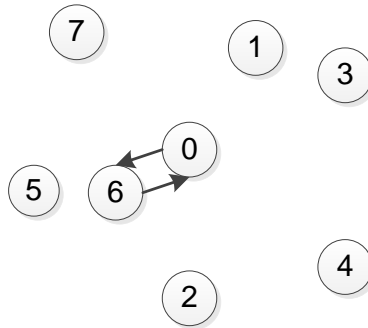
#### Primera ruta

- 1) Se empieza a construir el tour usando como punto de partida el cliente 0 (depósito).
- 2) El próximo cliente elegido es el cliente más cercano (menor tiempo), siempre que no esté incluido en el tour.

El cliente con menor distancia según la matriz de distancias desde el depósito es el cliente 6 y cumple con las restricciones, por lo que el cliente 6 es insertado a la ruta.

Ruta parcial N1: 0-6-0

Figura 2. Ruta parcial N1.



3) Repetir el paso 2 hasta que todos los clientes estén en el tour. En cada momento hay que verificar que no se viole la restricción de capacidad de los vehículos ni las ventanas de tiempo para cada cliente.

En la tabla 4 se analizan las restricciones de tiempo y capacidad de los clientes factibles que pueden insertarse partiendo del cliente 6:

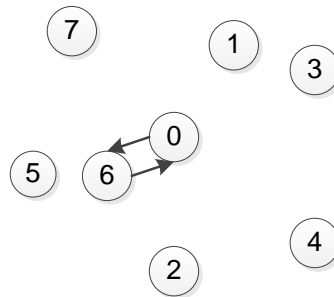
Tabla 4. Cumplimiento de restricciones para agregar nuevo cliente a la ruta.

CLIENTE	Restricción de tiempo		Restricción de capacidad	
	SI	NO	SI	NO
1		X	X	
2		X	X	
3		X	X	
4		X	X	
5		X	X	
7		X	X	

Como ninguno de los clientes restantes se considera factible. Se finaliza la ruta N1:

Ruta N1: 0-6-0

Figura 3. Primera ruta.



El tiempo de recorrido de la ruta N1 es de 122.18 unidades de tiempo considerando la distancia del cliente 6 al depósito.

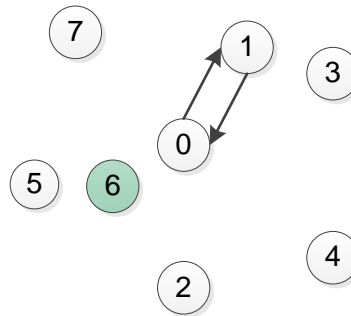
### Segunda ruta

Para esta ruta se vuelve a seguir los pasos del diagrama. Se observa en la matriz de distancias, la mínima distancias desde el depósito hasta cada uno de los clientes disponibles.

El cliente con menor distancia según la matriz de distancias desde el depósito es el cliente 1 y cumple con las restricciones, por lo que el cliente 1 es insertado a la ruta.

Ruta parcial N2: 0-1-0

Figura 4. Ruta parcial N2.



En la tabla 5 se analizan las restricciones de tiempo y capacidad de los clientes factibles que pueden insertarse partiendo del cliente 1:

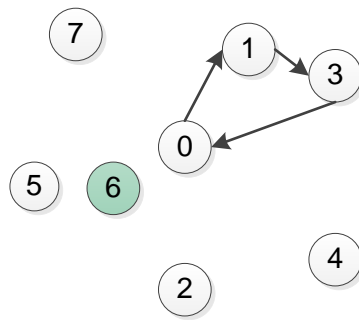
Tabla 5. Cumplimiento de restricciones para agregar un cliente a la ruta.

CLIENTE	Restricción de tiempo		Restricción de capacidad	
	SI	NO	SI	NO
2		X	X	
3	X		X	
4	X		X	
5	X			X
7	X		X	

Entonces ya sabiendo cuales pares cumplen con las restricciones, se procede a observar en la matriz de distancias cual es la menor de 1 a esta, observando la prioridad en cuanto a sus ventanas de tiempo. Por lo que se escoge al cliente 3 para ser insertado en la ruta.

Ruta parcial N2: 0-1-3-0

Figura 5. Ruta parcial N2.



En la tabla 6 se analizan las restricciones de tiempo y capacidad de los clientes factibles que pueden insertarse partiendo del cliente 3:

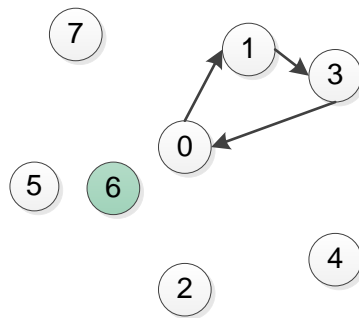
Tabla 6. Cumplimiento de restricciones para agregar un cliente a la ruta.

CLIENTE	Restricción de tiempo		Restricción de capacidad	
	SI	NO	SI	NO
2		X	X	
4	X			X
5		X		X
7		X	X	

Como ninguno de los clientes restantes se considera factible. Se finaliza la ruta N2:

Ruta N2: 0-1-3-0

Figura 6. Segunda ruta.



El tiempo de recorrido de la ruta N2 es de 90.921 unidades de tiempo considerando la distancia del cliente 3 al depósito.

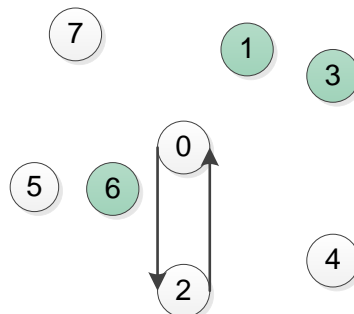
### Tercera ruta

Para esta ruta se vuelve a seguir los pasos del diagrama. Se observa en la matriz de distancias, la mínima distancias desde el depósito hasta cada uno de los clientes disponibles.

El cliente con menor distancia según la matriz de distancias desde el depósito es el cliente 2 y cumple con las restricciones, por lo que el cliente 2 es insertado a la ruta.

Ruta parcial N3: 0-2-0

Figura 7. Ruta parcial N3.



En la tabla 7 se analizan las restricciones de tiempo y capacidad de los clientes factibles que pueden insertarse partiendo del cliente 2:

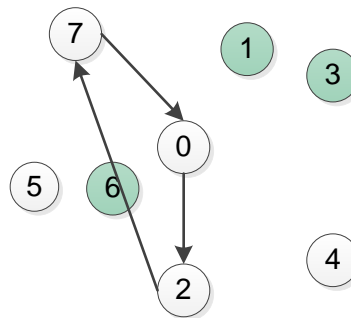
**Tabla 7. Cumplimiento de restricciones para agregar un cliente a la ruta.**

CLIENTE	Restricción de tiempo		Restricción de capacidad	
	SI	NO	SI	NO
4	X		X	
5	X			X
7	X		X	

Entonces ya sabiendo cuales pares cumplen con las restricciones, se procede a observar la prioridad en cuanto a sus ventanas de tiempo y capacidad. Por lo que se escoge al cliente 7 para ser insertado en la ruta.

Ruta parcial N3: 0-2-7-0

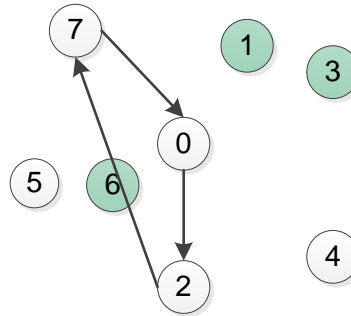
**Figura 8. Ruta parcial N3.**



Como los clientes restantes no cumplen con la capacidad ya que hasta el momento se lleva 12 y los clientes 4 y 5 tienen una demanda de 19 y 26 respectivamente sobrepasan la capacidad del vehículo, se finaliza la ruta 3.

Ruta N3: 0-2-7-0

Figura 9. Tercera ruta.



El tiempo de recorrido de la ruta N3 es de 112.213 unidades de tiempo considerando la distancia del cliente 7 al depósito.

Cuarta y quinta ruta

Los clientes restantes son 4 y 5. Como la suma de sus demandas sobrepasa la capacidad de un vehículo, deben servirse en rutas separadas como se muestra en la figura

Ruta N4: 0-4-0

Ruta N5: 0-5-0

Figura 10. Rutas cuarta y quinta del ejemplo.

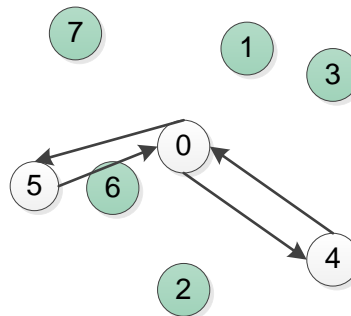


Figura 11. Representación de la solución inicial del ejemplo.

0	6	0	1	3	0	2	7	0	4	0	5	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

## ANEXO F.

### CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN DEL ALGORITMO MEMÉTICO EN MATLAB

```
function varargout = Interfaz(varargin)
% INTERFAZ MATLAB code for Interfaz.fig
%   INTERFAZ, by itself, creates a new INTERFAZ or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = INTERFAZ returns the handle to a new INTERFAZ or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   INTERFAZ('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in INTERFAZ.M with the given input
arguments.
%
%   INTERFAZ('Property','Value',...) creates a new INTERFAZ or raises
the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
are
%   applied to the GUI before Interfaz_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property
application
%   stop. All inputs are passed to Interfaz_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only
one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Interfaz

% Last Modified by GUIDE v2.5 18-Oct-2016 01:39:59

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Interfaz_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Interfaz_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
```

```

% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Interfaz is made visible.
function Interfaz_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Interfaz (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Interfaz
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Interfaz wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Interfaz_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function nAgentes_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to nAgentes (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of nAgentes as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of nAgentes
%        as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function nAgentes_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to nAgentes (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
%            called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

```

```

%       See ISPC and COMPUTER.
if      ispc      &&      isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in Procesar.
function Procesar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to Procesar (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

nClient1=0; nClient2=0; nRev=0; nAsig=0; Dist=0;

nAgent=str2num(get(handles.nAgentes,'String'));
nIter=str2num(get(handles.nIteraciones,'String'));
PorCap=str2num(get(handles.Capacidad,'String'));
Parada=str2num(get(handles.Parada,'String'));

if isempty(nAgent)
    errordlg('Debe especificar el número de agentes');
    return;
end
if isempty(nIter)
    errordlg('Debe especificar el número de iteraciones');
    return;
end
if isempty(PorCap)
    errordlg('Debe especificar el porcentaje de capacidad por ruta');
    return;
end
if isempty(Parada)
    errordlg('Debe especificar el criterio de parada para las mejoras');
    return;
end

MatEntradas=xlsread('Entradas.xlsx');
[m,n] = size(MatEntradas);

nAlb=0;
while (~isnan(MatEntradas((nAlb+1),n)))
%     if(nAlb>0) VecCap(nAlb)=MatEntradas((nAlb),n); end
    nAlb=nAlb+1;
end
nAlb=nAlb-1;
nPE=m-1-nAlb;

CapVeh=MatEntradas(1,n);
VecCap=MatEntradas(2:(nAlb+1),n);

```

```

MatDist=xlsread('Entradas.xlsx',2);
[m1,n1] = size(MatDist);

if((m1~=m) || (n1~=m))
    MatDist=zeros((m-1),(m-1));
    XC1=0; XC2=0; YC1=0; YC2=0;
    for nClient1=1:(m-1)
        for nClient2=1:(m-1)
            if (nClient1==nClient2)
                MatDist(nClient1,nClient2)=0;
            else
                XC1=MatEntradas((nClient1+1),2);
                YC1=MatEntradas((nClient1+1),3);
                XC2=MatEntradas((nClient2+1),2);
                YC2=MatEntradas((nClient2+1),3);
                MatDist(nClient1,nClient2)=abs(sqrt((XC2-XC1)^2+(YC2-
YC1)^2));
            end
        end
    end
else
    MatDist(1,:)=[]; MatDist(:,1)=[];
end

% Para separar la matriz de los albergues a PE y la matriz de los PE a
% los PE,teniendo en
% cuenta solo los valores de ida.

[m1,n1] = size(MatDist);
MatAlbPE=MatDist(1:nAlb,(nAlb+1):n1);
MatPEPE=MatDist((nAlb+1):m1,(nAlb+1):n1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% xlswrite('Entradas.xlsx',MatDist,2)

%MatRut en donde se encontrarán los agentes y las rutas asignadas
MatRut=zeros(nAgent,nAlb,1);
% Se crea la matriz inicial de agentes
MatAgent=uint8(rand(nAgent,nAlb));
MatRut(:,:,1)=MatAgent;
MatRut(:,:,2)=zeros(nAgent,nAlb);
% % Se crea la matriz inicial de asignaciones
% MatAsig=zeros(nAgent,nPE);

mejF=inf;
mejSol=0;

%Se crea la matriz de posibles asignaciones de puntos de encuentro a
%albergues, teniendo en cuenta la ventana de tiempo (parámetro b)
MatPosibleAlbIni=zeros(nAlb,(n1-nAlb));
for iAlb=1:nAlb
    for iPE=1:nPE

```

```

MatPosibleAlbIni (iAlb,iPE)=MatAlbPE (iAlb,iPE);
  %Para verificar que se cumpla el parámetro b del PE
b=MatEntradas ((iPE+1+nAlb),6);
if (MatAlbPE (iAlb,iPE)>b)
  MatPosibleAlbIni (iAlb,iPE)=inf;
end
  %Para verificar que se cumpla el parámetro b del Albergue
a=MatEntradas ((iPE+1+nAlb),5);
s=MatEntradas ((iPE+1+nAlb),7);
if (MatAlbPE (iAlb,iPE)>=a)
  t=MatAlbPE (iAlb,iPE);
else
  t=a;
end
t=t+s+MatDist ((iPE+nAlb),iAlb);
if (t>MatEntradas ((iAlb+1),6))
  MatPosibleAlbIni (iAlb,iPE)=inf;
end
cAlb=MatEntradas ((iAlb+1),10);
cPE=MatEntradas ((iPE+1+nAlb),4);
if (cPE>cAlb)
  MatPosibleAlbIni (iAlb,iPE)=inf;
end
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
CTmax=0;
iPEmax=0;
VecF=zeros (1,nAgent);

%Se revisa que haya al menos un albergue abierto
%Se revisa que la capacidad total de éstos sea mayor o igual a la demanda
iParada4=1;
if (Parada>10)
  iParada4=Parada-10;
end
nAsig=1;
while ((nAsig<=nAgent)&&(iParada4<Parada))
  CT=0;
  VecContrutas=zeros (1,nAlb);
  VecContrutas (1,:)=2;

while ((sum (MatAgent (nAsig,:))==0) || (sum (double (MatAgent (nAsig,:))' ).*VecCap) < sum (MatEntradas (2:m,4)))
  MatAgent (nAsig,:)=uint8 (rand (1,nAlb));
  MatRut (nAsig,:,1)=MatAgent (nAsig,:);
end
  MatPosibleAlb=MatPosibleAlbIni;
  MatPosiblePE=MatPEPE;

  inicio=true;

  %Se deshabilitan las opciones de los albergues no asignados,
  volviendo

```

```

%infinito sus valores

%Volver infinito la diagonal de ceros
for iPE=1:nPE
    MatPosiblePE(iPE, iPE)=inf;
end
iPE=0;
iParada2=1;
AlbSelec=0;
while((iPE<nPE) && (iParada2<Parada))
    MatPosibleAlb2=MatPosibleAlb;
    for iAlb=1:nAlb
        if(MatAgent(nAsig, iAlb)==0)
            MatPosibleAlb2(iAlb, :)=Inf;
        end
    end
end

if(AlbSelec==nAlb)
    AlbSelec=0;
end
iAlb=1;
while((MatAgent(nAsig, iAlb)==0) || (iAlb<=AlbSelec) && (iAlb<nAlb))
    iAlb=iAlb+1;
end
AlbSelec=iAlb;
if((iAlb==nAlb) && (AlbSelec~=nAlb))
    AlbSelec=0;
    iAlb=1;
end

while((MatAgent(nAsig, iAlb)==0) || (iAlb<=AlbSelec) && (iAlb<nAlb))
    iAlb=iAlb+1;
end
AlbSelec=iAlb;

%Se busca el mínimo valor de la matriz para asignarlo a su
albergue
for iAlb=1:nAlb

    if((MatAgent(nAsig, iAlb)==1) && ((inicio) || (iAlb==AlbSelec)))
%
        [M, I] = min(MatPosibleAlb2(:));
        x=ceil(rand(1)*nPE);
        y=iAlb;
%
        y=ceil(rand(1)*nAlb);
        iParada=1;
        while((MatPosibleAlb2(y, x)==inf) && (iParada<Parada))
            x=ceil(rand(1)*nPE);
            iParada=iParada+1;
        end

        M=MatPosibleAlb2(y, x);

        if(M==inf)

```

```

[M,I] = min(MatPosibleAlb2(iAlb,:));
x=I;
end

if (M~=inf)%

MatPosibleAlb2(y,:)=inf;
MatPosibleAlb2(:,x)=inf;
MatPosibleAlb(:,x)=inf;

MatPosiblePE(:,x)=inf;

VecContrutas(y)=VecContrutas(y)+1;
if(~inicio)
VecContrutas(y)=VecContrutas(y)+2;
end

MatRut(nAsig,y,VecContrutas(y))=x;

MatTemp=MatRut(nAsig,,:);
final=length(MatTemp(1,1,:));

[cumple,t]=ValidaAlb(MatTemp,MatEntradas,MatDist,VecCap,CapVeh,PorCap,nAlb,final,iAlb);

if(~cumple)
MatRut(nAsig,y,VecContrutas(y))=0;
VecContrutas(y)=VecContrutas(y)-1;
if(~inicio)
VecContrutas(y)=VecContrutas(y)-2;
end
else
iPE=iPE+1;
end
else
cumple=false;
end
if(~cumple)
if(inicio)
MatAgent(nAsig,y)=0;
MatRut(nAsig,y,1)=0;
end
if(AlbSelec==nAlb)
AlbSelec=0;
end
iAlb=1;

while((MatAgent(nAsig,iAlb)==0)|| (iAlb<=AlbSelec)) && (iAlb<nAlb)
iAlb=iAlb+1;
end
AlbSelec=iAlb;
if ((iAlb==nAlb) && (AlbSelec~=nAlb))
AlbSelec=0;
iAlb=1;

```

```

while((MatAgent(nAsig,iAlb)==0)|| (iAlb<=AlbSelec)) && (iAlb<nAlb)
    iAlb=iAlb+1;
    end
    AlbSelec=iAlb;
    end
    end
end

h=sum(MatAgent(nAsig,:));

if(iPE<sum(MatAgent(nAsig,:)))
%     if(iPE~=nPE)
%         break;
%     end
end

%Se crean las rutas con el criterio de vecino más cercano. Se van
%asignando a los puntos iniciales de los albergues hasta que sea
%necesario abrir una nueva ruta

iAlb=0;
for iAlb=1:nAlb
%     k=length(MatRut(1,1,:));
%     Mat(1:111,1:k)=MatRut(1,.,.);
%     cpTot=0;
    if((MatAgent(nAsig,iAlb)==1) && ((inicio)|| (iAlb==AlbSelec)))
        MatPosiblePE2=MatPosiblePE;
        Ft1=0;
        cumple=true;
        iParada=1;
        while((cumple) && (iParada<Parada))
            Cont=VecContrutas(iAlb);
%             if (Cont>length(MatRut(1,1,:)))
%                 k=7;
%             end
            PE=MatRut(nAsig,iAlb,Cont);
%             if (PE==0)
%                 k=5;
%             end
            [M,I] = min(MatPosiblePE2(PE,:));

            if (M~=inf)
%                 y=PE;
                x=I;
                MatRut(nAsig,iAlb,(Cont+1))=x;
                %Revisar si cumple las restricciones

                %%% Retroceder hasta llegar al cero anterior de la
                %%% ruta y desde ahí empezar a evaluar los
                %%% parámetro. Recordar revisar el criterio de
                %%% capacidad del vehículo y albergue.

```

```

Cont2=Cont;
while(MatRut(nAsig,iAlb,(Cont2-1))~=0)
    Cont2=Cont2-1;
end
t=0;
cp=0;
Aceptado=true;
for iRev=Cont2:(Cont+1)
    PE1=0;
    PE2=0;
    if(iRev==Cont2)
        PE1=iAlb;
        PE2=MatRut(nAsig,iAlb,iRev);
        PE2=nAlb+PE2;
    else
        PE1=MatRut(nAsig,iAlb,(iRev-1));
        PE2=MatRut(nAsig,iAlb,iRev);
        PE1=nAlb+PE1;
        PE2=nAlb+PE2;
    end
    t=t+MatDist(PE1, PE2);
    a=MatEntradas((PE2+1),5);
    s=MatEntradas((PE2+1),7);

    if(t<a)
        t=a;
    end

    %Para verificar que se cumpla el parámetro b
del PE
    b=MatEntradas((PE2+1),6);
    if(t>b)
        Aceptado=false;
    end

    t=t+s;

    %Para verificar que se cumpla la capacidad del
    %vehículo
    cp=cp+ceil(MatEntradas((PE2+1),4)*PorCap/100);
    if(cp>CapVeh)
        Aceptado=false;
    end

end

if(Aceptado)
    t=t+s+MatDist(PE2, iAlb);
%

```

```

t=t+MatDist(PE2, iAlb);
if(t>MatEntradas((iAlb+1),6))
    MatPosiblePE2(PE,x)=inf;
else
    MatTemp=MatRut(nAsig, :, :);
    final=length(MatTemp(1,1,:));
    if(iPE==(nPE-1))
        k=5;
    end
end

[cumple,t,CT]=Validar(MatTemp,MatEntradas,MatDist,VecCap,CapVeh,PorCap,nAlb,final);

    if(~cumple)
        MatPosiblePE2(PE,x)=inf;
        MatRut(nAsig,iAlb,(Cont+1))=0;
    else

%
VecCapAlb(iAlb)=VecCapAlb(iAlb)+MatEntradas((PE2+1),4);
        if(t>Ft1)
            Ft1=t;
        end
        if(x==0)
            k=5;
        end
    end

VecContRutas(iAlb)=VecContRutas(iAlb)+1;

MatRut(nAsig,iAlb,VecContRutas(iAlb))=x;
        MatPosibleAlb(:,x)=inf;
        MatPosiblePE2(:,x)=inf;
        MatPosiblePE(:,x)=inf;
        cumple=true;
        iPE=iPE+1;
    end
end
else
    MatPosiblePE2(PE,x)=inf;
    MatRut(nAsig,iAlb,(Cont+1))=0;
end
else
    break;
end
iParada=iParada+1;
end
%
VecContRutas(iAlb)=VecContRutas(iAlb)+2;
%
MatRut(nAsig,iAlb,VecContRutas(iAlb))=0;
end
end

if(inicio)
    inicio=false;
end

iParada2=iParada2+1;

```

```

end

MatTemp=MatRut (nAsig, :, :);
final=length (MatTemp (1, 1, :));

[cumple, Ft, CT]=Validar (MatTemp, MatEntradas, MatDist, VecCap, CapVeh, PorCap, n
Alb, final);

if (iPE==nPE)
    if ((Ft<mejF) || (iPEmax<nPE))
        mejSol=MatTemp;
        mejF=Ft;
    end
    iParada4=1;
    if (Parada>10)
        iParada4=Parada-10;
    end
    iPEmax=nPE;
    nAsig=nAsig+1;
else
    if ((CT>CTmax) && (iPEmax<nPE))
        mejSol=MatTemp;
        mejF=Ft;
    end
    MatAgent (nAsig, :)=0;
    iParada4=iParada4+1;
    MatRut (nAsig, :, 1)=MatAgent (nAsig, :);
    k=length (MatRut (1, 1, :));
    MatRut (:, :, (2:k))=zeros (nAgent, nAlb, (k-1));
    if (iPE>iPEmax)
        iPEmax=iPE;
    end
end

%     if (siguiente)
%         MatTemp=MatRut (nAsig, :, :);
%         cumple=true;
%     else
%         MatAgent (nAsig, :)=0;
%     end

end

%Hasta acá bien
%Para evaluar la función en cada caso
% k=length (MatRut (1, 1, :));
% Mat (1:111, 1:k)=MatRut (1, :, :);

for iAsig=1:nAgent
    MatTemp=MatRut (iAsig, :, :);
    final=length (MatTemp (1, 1, :));

[cumple, Ft]=Validar (MatTemp, MatEntradas, MatDist, VecCap, CapVeh, PorCap, nAlb
, final);

```

```

    VecF(1,iAsig)=Ft;
    if((Ft<mejF) && (cumple))
        mejSol=MatTemp;
        mejF=Ft;
    end

end

if(iPE~=nPE)
    errordlg('No se logró asignar la totalidad de puntos de encuentro');
    % return;
end

k=length(mejSol(1,1,:));
if(k>1);
    for iAlb=1:nAlb
        krta(1,iAlb)={ [num2str(iAlb)] };
        for iRuta=1:k
            krta((iRuta+1),iAlb)={mejSol(1,iAlb,iRuta)};
        end
    end
end

krta(1,(nAlb+2))={'F'};
krta(2,(nAlb+2))={mejF};

klimpiar=cell(1000,1000); xlswrite('Solución.xlsx',klimpiar);
xlswrite('Solución.xlsx',krta);
winopen('Solución.xlsx');

return;

%Para realización del torneo
%Crear piscina de la mitad de soluciones y luego cruzar para completarla
MatPisc=MatRut;
VecPiscF=zeros(1,nAgent);
nPisc=0;
nTor=ceil(nAgent/2);
for iTor=1:nTor
    p1=ceil(rand(1)*nAgent); p2=ceil(rand(1)*nAgent);
    sorteo=uint8(rand(1));
    if(sorteo) %selección del mayor
        if(p1>p2)
            MatPisc(iTor,,:)=MatRut(p1,,:);
            VecPiscF(iTor)=VecF(p1);
        else
            MatPisc(iTor,,:)=MatRut(p2,,:);
            VecPiscF(iTor)=VecF(p2);
        end
    end
end

```

```

else                                     %selección del menor
    if(p1>p2)
        MatPisc(iTor, :, :) = MatRut(p2, :, :);
        VecPiscF(iTor) = VecF(p2);
    else
        MatPisc(iTor, :, :) = MatRut(p1, :, :);
        VecPiscF(iTor) = VecF(p1);
    end
end
nPisc = nPisc + 1;
end
for iTor = 1:nTor
    MatRut(iTor, :, :) = MatPisc(iTor, :, :);
    VecF(iTor) = VecPiscF(iTor);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%Hasta acá bien

%Para realizar los cruces y mutacionesde acuerdo al número de iteraciones
%Modificar la mutación para que escoja aleatorio entre los albergues y
las
%rutas
iIter = 1;
while iIter <= nIter
    if(iIter > 1)
        MatRut = MatPisc;
        VecF = VecPiscF;
    end
    iTor = 1;
    for iTor = 1:nTor
        sorteo = ceil(rand(1) * nTor);
        if(sum(MatRut(sorteo, :, 1)) >= 2)
            intercambio = false;
            iParada = 1;
            while (~intercambio) && (iParada <= Parada)
                sorteo2 = ceil(rand(1) * nAlb);
                %
                for iAlb = 1:nAlb
                    if(MatRut(sorteo, sorteo2, 1) == 1)
                        %
                        intercambio = false;
                        %
                        iParada = 1;
                        while (~intercambio) && (iParada <= Parada)
                            sorteo3 = ceil(rand(1) * nAlb);

if (MatRut(sorteo, sorteo3, 1) == 1) && (sorteo2 ~= sorteo3)
                    %Se realiza un cruce temporal y se revisa
si es
                        %válido
                        MatTemp = MatRut(sorteo, :, :);
                        iCruce1 = 3;
                        while(MatRut(sorteo, sorteo2, iCruce1) ~= 0)
                            Vec1(iCruce1 -
2) = MatRut(sorteo, sorteo2, iCruce1);
                        %
                            MatTemp(iCruce1, sorteo2) = [];

```

```

        iCruce1=iCruce1+1;
    end

    iCruce2=3;
    while (MatRut (sorteo, sorteo3, iCruce2)~=0)
        Vec2 (iCruce2-
2)=MatRut (sorteo, sorteo3, iCruce2);
%           MatTemp (iCruce2, sorteo3)=[];
        iCruce2=iCruce2+1;
    end

    final=length (MatTemp (1, 1, :));

    MatTemp (1, :, (3:final))=0;

    for iCruce=2:(final-iCruce1)
MatTemp (1, sorteo2, iCruce)=MatRut (sorteo, sorteo2, (iCruce1+iCruce-1));
    end
    iCruce1=final;
    while (MatTemp (1, sorteo2, iCruce1)==0)
        iCruce1=iCruce1-1;
    end
    if (iCruce1==1)
        iCruce1=3;
    else
        iCruce1=iCruce1+3;
    end

    for iCruce=iCruce1:(iCruce1+length (Vec1)-
1)
MatTemp (1, sorteo2, iCruce)=Vec1 (iCruce-iCruce1+1);
    end

    for iCruce=2:(final-iCruce2)
MatTemp (1, sorteo3, iCruce)=MatRut (sorteo, sorteo3, (iCruce2+iCruce-1));
    end
    iCruce2=final;
    while (MatTemp (1, sorteo3, iCruce2)==0)
        iCruce2=iCruce2-1;
    end
    if (iCruce2==1)
        iCruce2=3;
    else
        iCruce2=iCruce2+3;
    end

    for iCruce=iCruce2:(iCruce2+length (Vec2)-
1)

```



```

MatTemp(1, sorteo2, sorteo3)=PE2;
MatTemp(1, sorteo4, sorteo5)=PE1;
final=length(MatTemp(1,1,:));

[cumple,Ft]=Validar(MatTemp,MatEntradas,MatDist,VecCap,CapVeh,PorCap,nAlb
,final);

    if(cumple)
        MatPisc((iTor+nTor),:,:)=MatTemp(1,:,:);
        VecPiscF(iTor+nTor)=VecF(sorteo);
        [mayF,I]=max(VecF(:));
        if(Ft<mayF)
            MatRut(sorteo1,:,:)=MatTemp(1,:,:);
            VecF(sorteo1)=Ft;
            intercambio=true;
        end
        if(Ft<mejF)
            mejF=Ft;
            mejSol=MatTemp(1,:,:);
        end
    end
end
iParada=iParada+1;
end

end
iParada=iParada+1;
end

%%Hasta acá bien

%Para realización de la inserción de un PE en otra posición aleatoria
final=length(MatRut(1,1,:));
intercambio=false;
iParada=1;
while((~intercambio)&&(iParada<=Parada))
    sorteo1=ceil(rand(1)*nAgent);
    sorteo2=ceil(rand(1)*nAlb);
    sorteo3=ceil(rand(1)*final);

    if((MatRut(sorteo1,sorteo2,sorteo3)~=0)&&(sorteo3>1))
        PE1=MatRut(sorteo1,sorteo2,sorteo3);
        intercambio=false;
        iParada=1;
    while((~intercambio)&&(iParada<=Parada))
        sorteo4=ceil(rand(1)*nAlb);
        sorteo5=ceil(rand(1)*final);
        if(sorteo5==final)
            MatRut(:,:(final+1))=0;
        end
        if(sorteo5==1)
            sorteo5=2;
        end
    end
end

```

```

        procesar=true;
        if(sorteo4==sorteo2)
%           if(sorteo5==sorteo3)
                procesar=false;
%           end
        end
        if(procesar)

if((MatRut(sorteo1,sorteo4,(sorteo5+1))~=0)|| (MatRut(sorteo1,sorteo4,(so
rteo5-1))~=0)|| (MatRut(sorteo1,sorteo4,sorteo5)~=0)) && (sorteo5>2))
            MatTemp=MatRut(sorteo1, :, :);
            final=length(MatTemp(1,1,:));

if((MatTemp(1,sorteo2,(sorteo3+1))==0) && (MatTemp(1,sorteo2,(sorteo3-
1))==0))
                nVeces=3;
            else
                nVeces=1;
            end
            for iVeces=1:nVeces
                for iVec=sorteo3:(final-1)

MatTemp(1,sorteo2,iVec)=MatTemp(1,sorteo2,(iVec+1));
                    end
                end
                if(sorteo4==sorteo2)
                    if(sorteo5>sorteo3)
                        sorteo5=sorteo5-1;
                    end
                end
                end

                for iVec=sorteo5:(final-1)

MatTemp(1,sorteo4,(iVec+1))=MatRut(sorteo1,sorteo4,iVec);
                    end
                    if((MatTemp(1,sorteo4,(sorteo5-
1))==0) && (MatTemp(1,sorteo4,sorteo5)==0))
                        MatTemp(1,sorteo4,(sorteo5+1))=PE1;
                    else
                        MatTemp(1,sorteo4,sorteo5)=PE1;
                    end
                    if(MatTemp(1,sorteo4,final)~=0)
                        MatTemp(1, :, (final+1))=0;
                        MatRut(:, :, (final+1))=0;
                    end
                    end

                    final=length(MatTemp(1,1,:));

[cumple,Ft]=Validar(MatTemp,MatEntradas,MatDist,VecCap,CapVeh,PorCap,nAlb
,final);

                if(cumple)

while(length(MatTemp(1,1,:))>length(MatPisc(1,1,:)))

```

```

MatPisc(:, :, (length(MatPisc(1, 1, :))+1))=0;
    end
    MatPisc((iTor+nTor), :, :)=MatTemp(1, :, :);
    VecPiscF(iTor+nTor)=VecF(sorteo);
    [mayF, I]=max(VecF(:));
    if(Ft<mayF)
        MatRut(sorteo1, :, :)=MatTemp(1, :, :);
        VecF(sorteo1)=Ft;
        intercambio=true;
    end
    if(Ft<mejF)
        mejF=Ft;
        mejSol=MatTemp(1, :, :);
    end
    iTor=iTor+1;
    intercambio=true;
end
end
end
    iParada=iParada+1;
end

end
    iParada=iParada+1;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

iIter=iIter+1;
end

% for iAlb=1:nAlb
%     krta(1, iAlb)={num2str(iAlb)};
%     for iRuta=1:length(mejSol(1, 1, :))
%         krta((iRuta+1), iAlb)={mejSol(1, iAlb, iRuta)};
%     end
% end
%
% krta(1, (nAlb+2))={'F'};
% krta(2, (nAlb+2))={mejF};
%
%
% limpiar=cell(1000,1000); xlswrite('Solución.xlsx', limpiar);
% xlswrite('Solución.xlsx', krta);
% winopen('Solución.xlsx');

```

```

function nIteraciones_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to nIteraciones (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of nIteraciones as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
nIteraciones as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function nIteraciones_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to nIteraciones (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Capacidad_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Capacidad (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Capacidad as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Capacidad
as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Capacidad_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Capacidad (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

% --- Executes on button press in Nuevo.
function Nuevo_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Nuevo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

function Parada_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Parada (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Parada as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Parada as
a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Parada_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Parada (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```