

**UN MODELO MULTI OBJETIVO DE LOCALIZACIÓN-RUTEO PARA LA  
PLANEACIÓN LOGÍSTICA EN LA FASE DE PREPARACIÓN A SISMOS EN  
BUCARAMANGA**

**KARIN JULIETH AGUILAR IMITOLA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
BUCARAMANGA**

**2017**

**UN MODELO MULTI OBJETIVO DE LOCALIZACIÓN-RUTEO PARA LA  
PLANEACIÓN LOGÍSTICA EN LA FASE DE PREPARACIÓN A SISMOS EN  
BUCARAMANGA**

**KARIN JULIETH AGUILAR IMITOLA**

**Trabajo de investigación para optar el título de Magíster en Ingeniería  
Industrial**

**Director:**

**HENRY LAMOS DÍAZ  
PhD en Física-Matemática**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
BUCARAMANGA**

**2017**

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	13
1 REVISIÓN DE LA LITERATURA .....	16
1.1 ESTADO DEL ARTE.....	16
1.1.1 Modelos de localización-ruteo .....	18
2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	23
3 OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO .....	27
4 ALGORITMO MEMÉTICO PARA LA SOLUCIÓN DEL LRP .....	29
4.1 NSGA II.....	29
4.1.1 Población inicial.....	29
4.1.2 Operadores de cruce y mutación .....	31
4.1.3 Operador de selección .....	32
4.2 BÚSQUEDA LOCAL.....	37
4.2.1 Swap .....	37
4.2.2 Inserción.....	38
4.3 PROCEDIMIENTO DEL ALGORITMO MEMÉTICO PROPUESTO .....	39
4.4 VALIDACIÓN DEL ALGORITMO MEMÉTICO .....	42
5 CASO DE ESTUDIO.....	45
5.1 DESCRIPCIÓN DEL CASO.....	45
5.1.1 Red de emergencia .....	46
5.1.2 Potenciales albergues temporales .....	48
5.1.3 Estimación de evacuados .....	50
5.2 PARÁMETRO DE CONFIABILIDAD.....	54

5.3	GENERACIÓN DE ESCENARIOS .....	56
5.3.1	Red de nodos.....	56
5.3.2	Demanda.....	57
5.3.3	Confiabilidad .....	57
6	RESULTADOS Y ANALISIS .....	59
6.1	RESULTADOS ESCENARIOS DE PRUEBA .....	59
7	CONCLUSIONES .....	81
8	RECOMENDACIONES.....	83
	BIBLIOGRAFIA.....	84

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de codificación de la solución .....	30
Figura 2. Ejemplo del operador de cruce .....	32
Figura 3. Funcionamiento operador de selección basado en Deb et al., (2002) ....	34
Figura 4. Ejemplo del movimiento swap .....	38
Figura 5. Ejemplo del movimiento de Inserción .....	39
Figura 6. Diagrama de flujo del algoritmo memético propuesto. ....	41
Figura 7. Principales componentes de la red de emergencias para Bucaramanga .....	47
Figura 8. Geo-localización de nodos albergue y perfilamiento .....	49
Figura 9. Geo-localización de nodos albergue y perfilamiento .....	49
Figura 10. Zonas de mayor vulnerabilidad sísmica de acuerdo a Maldonado y Chio (2005) .....	51
Figura 11. Ubicación de los nodos clientes(a) y agregación por manzanas (b) ....	53
Figura 12. Mapa de vulnerabilidad promedio de Bucaramanga.....	55
Figura 13. Soluciones del frente de Pareto en cada combinación de parámetros en el escenario 1.....	61
Figura 14. Frente de Pareto para el escenario 1 bajo los parámetros 300 individuos -20 generaciones .....	62
Figura 15. Solución minimizando el tiempo total de evacuación (Escenario 1) ....	63
Figura 16. Solución minimizando la confiabilidad total de los albergues abiertos (Escenario 1).....	64
Figura 17. Albergues habilitados y puntos de clientes en (a) la solución minimizando tiempo, (b) la solución minimizando confiabilidad.....	65
Figura 18 Asignación de clientes en la solución minimizando el tiempo total de evacuación (Escenario 1) .....	66
Figura 19 Asignación de clientes en la solución minimizando la confiabilidad (Escenario 1).....	67

Figura 20. Caso ruta corta: ruta e indicaciones para dirigirse a un albergue desde un nodo cliente (Minimizando tiempo) .....	69
Figura 21. Caso ruta larga: ruta e indicaciones para dirigirse a un albergue desde un nodo cliente (minimizando tiempo) .....	70
Figura 22 Soluciones del frente de Pareto en cada combinación de parámetros en el escenario 2.....	72
Figura 23. Frente de Pareto para el escenario 2 bajo los parámetros 100 individuos -20 generaciones .....	73
Figura 24. Solución minimizando el tiempo total de evacuación (Escenario 2) .....	74
Figura 25. Solución minimizando la confiabilidad total de los albergues abiertos (Escenario 2).....	75
Figura 26. Albergues habilitados y puntos de clientes en (a) la solución minimizando tiempo, (b) la solución minimizando confiabilidad .....	76
Figura 27 Asignación de clientes al nodo Universidad Industrial de Santander en la solución minimizando el tiempo total de evacuación (Escenario 2) .....	77
Figura 28. Asignación de clientes al nodo Universidad Industrial de Santander en la solución minimizando la confiabilidad (Escenario 2).....	78
Figura 29 Ejemplo de una ruta e indicaciones para dirigirse a un albergue desde un nodo cliente (Minimizando confiabilidad) .....	80

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Síntesis de literatura sobre el Location-Routing Problem LRP aplicado a gestión de desastres.....	20
Tabla 2. Uso de algoritmo memético en LRP y variantes. ....	22
Tabla 3. Resultados de la validación del algoritmo memético en instancias del LRP capacitado .....	44
Tabla 4. Zonas más afectadas de acuerdo a los escenarios .....	51
Tabla 5. Habitantes por km <sup>2</sup> en cada zona .....	52
Tabla 6. Porcentaje de evacuados en la zona k para un sismo de intensidad t.....	53
Tabla 7. Número de nodos y porcentaje de evacuados por zona .....	57
Tabla 8. Índice Promedio de Vulnerabilidad para las zonas geomórfica.....	58
Tabla 9. Corridas de prueba escenario intensidad nivel 6 .....	60
Tabla 10 Soluciones de Pareto (300 individuos, 20 generaciones) para el escenario 1 (t=6) .....	62
Tabla 11. Corridas de prueba escenario intensidad nivel 7 .....	71
Tabla 12 Soluciones de Pareto (100 individuos, 20 generaciones) para el escenario 2 (t=7) .....	73

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Pseudocódigo del enfoque de ordenamiento rápido no dominado propuesto por Deb et al. (2002) .....	36
Cuadro 2. Pseudocódigo del enfoque de ordenamiento por distancia de crowding propuesto por Deb et al., (2002) .....	37
Cuadro 3. Fórmulas para el cálculo de la capacidad de los albergues .....	50

## RESUMEN

**TITULO:** UN MODELO MULTIOBJETIVO DE LOCALIZACIÓN-RUTEO PARA LA PLANEACIÓN LOGÍSTICA EN LA FASE DE PREPARACIÓN A SISMOS EN BUCARAMANGA\*

**AUTOR:** KARIN JULIETH AGUILAR IMITOLA\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Algoritmo memético, gestión de desastres, localización-ruteo.

### CONTENIDO

Esta investigación se centra en un problema de localización-ruteo (*Location Routing Problem LRP*) multiobjetivo capacitado (MCLRP) y tiene como propósito desarrollar un algoritmo memético para encontrar soluciones al problema de localización de albergues y diseño de rutas de evacuación en la fase de preparación a desastres por sismos en la ciudad de Bucaramanga. Para tal fin esta investigación se ciñe a las etapas usuales-no secuenciales- de un estudio de investigación de operaciones. Se realizó una revisión de la literatura tanto en modelos de optimización aplicados a la gestión de desastres, como en el uso de algoritmos meméticos para la solución del LRP. Así mismo se recolectó información para el modelamiento de los nodos de oferta y demanda en un sistema de información geográfico que constituyeron la red de nodos. Se formuló el modelo matemático de problema y con base en él se construyó el algoritmo memético para la solución del MCLRP. La validación de la eficacia y eficiencia del modelo propuesta se realizó a través de instancias de la literatura. Finalmente el modelo es ejecutado para el caso de amenaza sísmica en la ciudad de Bucaramanga. Para la visualización de los resultados se desarrolló una herramienta web basada en el lenguaje de programación Go. Los resultados permiten al tomador de decisiones determinar cuáles albergues se abrirán y las rutas de evacuación desde cada nodo de demanda hasta su albergue asignado.

---

\* Tesis de Maestría

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales.  
Director: Henry Lamos Díaz

## ABSTRACT

**TITLE:** A MULTI-OBJECTIVE LOCATION-ROUTING MODEL FOR LOGISTIC PLANNING IN PREPARATION STAGE TO EARTHQUAKES IN BUCARAMANGA\*

**AUTHOR:** KARIN JULIETH AGUILAR IMITOLA\*\*

**KEYWORDS:** Memetic algorithm, disaster management, location-routing

### DESCRIPTION

This research focuses in a Multiobjective Location Routing Problem (MCLRP) model and aims to develop a memetic algorithm to find solutions to shelters location problem and evacuation routes design in the preparation stage to earthquake disasters in Bucaramanga city. For this purpose this research is limited to the usual and not sequential steps of an operations research survey. A review of the literature was made both in the optimization models applied to disaster management and in the use of algorithms for the LRP solution. Likewise, information supply and demand nodes the modeling was collected in a geographic information system, that information constituted the network of nodes. The problem's mathematical model was formulated and based on it, the memetic algorithm for the MCLRP solution was constructed. The model's efficacy and efficiency validation was made by means of literature instances. Finally the model is executed for the case of seismic threat in Bucaramanga city. For the visualization of the results the web tool was developed based on the Go programming language. The results allow the decision maker to determine which shelters will be opened and the evacuation routes from each demand node to its assigned shelter

---

\* MS.c Thesis

\*\* Faculty of Engineering Physicomechanical. School of Industrial and Business Studies. Director: Henry Lamos Díaz.

## INTRODUCCIÓN

En años recientes una gran parte de la población se ha visto afectada por desastres tanto naturales como causados por el hombre. Sólo en 2014 se presentaron 324 desastres naturales afectando a 94 países, causando la muerte de 7823 personas, 140.7 millones de víctimas y daños por US\$ 99.2 billones (Guha-sapir, Hoyois, & Below, 2014). A pesar de que se ha avanzado en la comprensión de los desastres, algunas sociedades aun no tienen capacidad suficiente para hacer frente a efectos masivos destructivos; por lo cual, es necesario no solo actuar sobre los elementos en riesgo sino además la planificación de diversas operaciones de ayuda.

En este contexto, se define la gestión de desastres como un conjunto de procesos diseñados para ser implementados antes, durante y después de los desastres para prevenir o mitigar sus efectos; esta disciplina implica la preparación para los desastres, responder a ellos y finalmente el apoyo y la reconstrucción de la sociedad. El ciclo de gestión de desastres incluye cuatro etapas, mitigación, preparación, respuesta y recuperación. Basado en los objetivos, incertidumbre y duración, las dos primeras etapas pueden clasificarse como operaciones de apoyo, mientras que las dos últimas pueden ser clasificadas como operaciones de desarrollo o logística humanitaria pos desastre (Holguín-Veras et al., 2012; Ortuño et al., 2013).

Como consecuencia de la incertidumbre relacionada a los desastres, es determinante la planificación eficaz de las operaciones dentro de las etapas del ciclo de la gestión de desastres. Muchas de las decisiones involucradas deben ser tomadas con anticipación o poco después de que ocurre un evento; lo que hace posible que la toma de decisiones esté sujeta a errores; por lo tanto las técnicas avanzadas para la toma de decisiones juegan un rol importante en los sistemas logísticos humanitarios. Entre las diversas técnicas de análisis, la OR/MS (Operations Research and Management Science) representa un conjunto de

herramientas analíticas que facilitan la toma de decisiones y consecuentemente permiten mejorar el rendimiento de los sistemas de atención de desastres.

En los últimos años la comunidad académica y profesional en OR/MS ha incrementado su interés en desarrollar sistemas logísticos ágiles capaces de atender diferentes tipos de desastres, buscando el aumento de la eficiencia y la eficacia de la respuesta al desastre y la reducción de los impactos. Este interés no solo se relaciona con el impacto que tiene la gestión de desastres en la sociedad, sino además con la adaptabilidad de modelos de OR/MS a las diferentes operaciones en gestión de desastres

Una de las operaciones de socorro fundamentales para una respuesta acertada ante un terremoto, es la evacuación de la población, la cual se prepara anticipadamente y se ejecuta como parte de la respuesta al desastre para sacar a los heridos y a los afectados de la zona de peligro. Para modelar la operación de evacuación, uno de los problemas de optimización usados es el problema que integra las decisiones de localización de instalaciones y ruteo de vehículos, conocido como Location Routing Problema (LRP). En el caso de la planeación de evacuación de civiles, el LRP permite determinar de acuerdo a la necesidades de atención del desastre, el número y la ubicación de los albergues temporales y el diseño de las rutas de evacuación usadas por los habitantes para llegar a estos sitios, con el propósito de minimizar objetivos generalmente relacionados con el tiempo de atención y la satisfacción de las víctimas.

Al ser un problema NP-Hard (Cornuejols, Fisher, & Nemhauser, 1977; Karp, 1972), el LRP ha sido solucionado mediante diferentes métodos heurísticos. Muchos de estos algoritmos están basados en la inteligencia biológica y natural. Estos algoritmos inteligentes incluyen entre otros, redes neuronales, la computación evolutiva, inteligencia de partículas, sistemas inmunes artificiales y sistemas difusos. Además se encuentran métodos híbridos que combinan conceptos de diferentes metaheurísticas con el fin de aprovechar las ventajas de las estrategias implícitas en el enfoque de cada uno de ellas. Dentro de estas metaheurísticas se

encuentran los paradigmas que conforman la computación evolutiva encargados de realizar la exploración del espacio de búsqueda, aunado a métodos de búsqueda local, que desarrollan la explotación de las soluciones, estos se conocen como algoritmos meméticos.

Esta investigación se centra en un LRP multiobjetivo capacitado (MCLRP) y tiene como propósito desarrollar un algoritmo memético para encontrar soluciones al problema de localización de albergues y diseño de rutas de evacuación en la fase de preparación a desastres por sismos en la ciudad de Bucaramanga, capital del departamento de Santander (Colombia). Para tal fin esta investigación se ciñe a las etapas usuales-no secuenciales- de un estudio de investigación de operaciones presentadas por Hillier y Lieberman, (2010). Se realiza una revisión de la literatura tanto en modelos de optimización aplicados a la gestión de desastres, como en el uso de algoritmos meméticos para la solución del LRP. Así mismo se recolecta información para el modelamiento de los nodos de oferta y demanda del problema en un sistema de información geográfico. Se formula el modelo matemático del problema y con base en él se construye el algoritmo memético para la solución del MCLRP. La validación de la eficacia y eficiencia del modelo propuesta se realiza a través de instancias de la literatura. Finalmente el modelo es ejecutado para el caso de amenaza sísmica en la ciudad de Bucaramanga.

Este documento está organizado de la siguiente manera. En la sección 1 se presenta la revisión de la literatura que apoya a la presente investigación. En la sección 2 se define el problema abordado. En la sección 3 se describe y explica el método de solución empleado. En la sección 4 se presenta la aplicación del enfoque propuesto mediante un caso de estudio de la ciudad de Bucaramanga. En la Sección 5 se realiza la discusión de los resultados obtenidos. En la Sección 6 se presentan las conclusiones de la investigación realizada. Finalmente, en la Sección 7 se encuentran las referencias bibliográficas consultadas para el desarrollo de la investigación.

# 1 REVISIÓN DE LA LITERATURA

## 1.1 ESTADO DEL ARTE

Las investigaciones en gestión de las operaciones de desastres (DOM) se han dedicado principalmente a tres etapas en el ciclo de vida del desastre: (Pre-desastre) la preparación, (pos-desastre) la respuesta y recuperación. Cada etapa cuenta con sus propias operaciones, de las cuales un gran número han sido estudiadas desde la OR para mejorar su comprensión y desarrollo. En este estudio la literatura encontrada se dividió en categorías, teniendo en cuenta los principales problemas identificados en las investigaciones DOM. Estas categorías corresponden a 1) Diseño de la red y Localización, (2) Transporte, (3) Localización y Transporte, (4) Inventarios y (5) otras contribuciones menos populares en DOM.

Este análisis de la literatura permite identificar que: las investigaciones en la categoría 1 se han centrado en la fase de respuesta, donde es notable que la programación matemática es el método más usado. La localización ha sido modelada principalmente mediante el problema de localización de instalaciones (FLP) y modelos de cobertura, mono objetivo y durante un solo periodo. Algunas contribuciones multiobjetivo que buscan minimizar el costo, la demanda insatisfecha o el tiempo, son presentadas por Altay (2013); Görmez, Köksalan, y Salman (2010); Noyan (2012); Onan, Ulengin, y Sennaroglu (2015). Con el propósito de representar la incertidumbre en relación con el proceso de estimación del impacto del desastre, contribuciones en el diseño de la red abordan modelos estocásticos. En estos modelos, la incertidumbre no solo está asociada a la demanda, sino también a los suministros, el costo de adquisición y el de transporte, así como otras características del desastre (Bozorgi-Amiri, Jabalameli, & Al-e-Hashem, 2013; Du & Peeta, 2014;

Kelle, Schneider, & Yi, 2014; Martel, Benmoussa, Chouinard, Klibi, & Kettani, 2012), centrados principalmente en la minimización del costo.

La categoría Transporte, comprende la distribución de suministros, el transporte de víctimas y heridos, la evacuación de la población, y la búsqueda de víctimas. Estas operaciones son modeladas en su mayoría como un problema de ruteo de vehículos (VRP) y sus variantes, o distribución de última milla. Se han propuesto una variedad de modelos de programación entera, siendo el MIP (*Mixed-integer programming*) el más popular con propuestas como las de Bish, Sherali, y Hobeika (2014); Jin et al. (2015); Paul y Wang (2015). Otros métodos heurísticos también han sido propuestos como el algoritmo genético (Chang et al., 2014; Goerigk, Deghdak, & Heßler, 2014) y la búsqueda local (Asfar, Prins, & Santos, 2014; Rivera, Afsar, & Prins, 2015).

En la categoría 3, se ubican las contribuciones que presentan tanto problemas de localización como de transporte. En esta categoría el modelo más usado es el problema de localización-ruteo (LRP) (Ahmadi, Seifi, & Tootooni, 2015) y sus variantes, *Capacitated Location Routing Problem* (CLRP) (Zhang et al., 2015); *Open Location Routing Problem* (OLRP) (Wang, Du, & Ma, 2014), *Warehouse Location Routing Problem* (WLRP) (Rath & Gutjahr, 2014a). Otros modelos usados son el *Covering Tour Problem* (Naji-Azimi et al., (2012) y modelos de localización-transporte (Abounacer, Rekik, & Renaud, 2014b; Najafi et al., 2015). En su mayoría son multicriterio con objetivos clásicos como el tiempo, el costo y la cobertura. Por otra parte, tanto la planificación (pre-posicionamiento) como las estrategias de inventarios, son agrupadas en la categoría 4. Alrededor de la mitad de las contribuciones en esta categoría obedecen al pre-posicionamiento de bienes, cuyo objetivo común es la minimización del costo total. Diferentes metodologías han sido usadas para abordar las operaciones de inventario, métodos de solución desde la programación estocástica (Das & Hanaoka, 2014; Döyen, Aras, & Barbarosoğlu, 2012; Garrido, Lamas, & Pino, 2015; Rawls & Turnquist, 2010; Salmerón & Apte,

2010), la programación matemática (Campbell & Jones, 2011; Galindo & Batta, 2013; McCoy & Brandeau, 2011; Rottkemper et al., 2011), y la dinámica de sistemas (Kunz, Reiner, & Gold, 2014; Pen, Peng, & Chen, 2014), han sido propuestos.

La última categoría comprende a problemas menos populares que los presentados anteriormente, pero que representan una contribución valiosa en los aportes de OR para DOM. En esta categoría se encuentran los problemas de gestión de escombros (Celik, Ergun, & Keskinocak, 2015; Hu & Sheu, 2013; Onan et al., 2015), sistemas de información y comunicación (Li et al., 2014; Nagarajan, Shaw, & Albores, 2012; Preece, Shaw, & Hayashi, 2015), sistema de apoyo a la toma de decisiones (DSS) (Fogli & Guida, 2013; Rodríguez et al., 2011), programación de recursos (Lassiter, Khademi, & Taaffe, 2015; Rachaniotis, Dasaklis, & Pappis, 2012; Zheng et al., 2014) y la mejora de infraestructura (Peeta et al., 2010), entre otros.

Los resultados de esta revisión de literatura se presentan a detalle en el artículo titulado “*OR/MS in disaster management operations: a review*” el cual se encuentra sometido en la revista IIE Transactions.

### **1.1.1 Modelos de localización-ruteo**

El problema de localización y el de ruteo constituyen dos enfoques fundamentales en la gestión de desastres. Nagy y Salhi (2007) destacan que las decisiones de estos problemas se interrelacionan. Asimismo se reconoce que para una adecuada gestión de las operaciones logísticas, es necesario modelos cada vez más asociados en los que las decisiones se interrelacionen y sean optimizadas de forma simultánea (Salhi & Rand, 1989). Por lo tanto, la evolución natural del proceso de optimización es a través de una perspectiva integral, este tipo de decisiones es a través de un problema de localización y de ruteo desde una perspectiva integral; El modelo que integra las decisiones de localización y las de ruteo se conoce como *Location Routing Problem (LRP)*.

Diferentes revisiones de literatura que abordan el LRP se han presentado en los últimos años (Drexl & Schneider, 2015; Min, Jayaraman, & Srivastava, 1998; Nagy & Salhi, 2007; Prodhon & Prins, 2014). El LRP ha sido aplicado para la toma de decisiones en logística humanitaria en diversos desastres naturales. La tabla 1 muestra una síntesis del uso del LRP en la gestión de desastres, los principales objetivos, el método de solución, el tipo de desastre y flota, las principales restricciones y el tipo de test realizado.

Por otra parte, se identifica en la literatura el uso de algoritmos meméticos para la solución del problema de localización-ruteo y las aplicaciones de este algoritmo en la gestión de desastres. La tabla 2 muestra los resultados encontrados. Para cada publicación se establece, el método usado para la codificación de la solución, el método para generar la población inicial, y los elementos que componen el algoritmo memético.

Los hallazgos indican que el problema de localización-ruteo ha sido abordado a través de diferentes enfoques, en su mayoría multiobjetivo debido a la importancia e interrelación de las decisiones involucradas en la gestión de desastres; al respecto, algunos autores señalan que la naturaleza multiobjetivo del problema incrementa la complejidad computacional y el análisis y comparación de soluciones no-dominadas (Alçada-Almeida et al., 2009). Además, el LRP ha sido solucionado principalmente mediante métodos heurísticos. El uso de algoritmos meméticos en la solución del LRP no es frecuente, en la mayoría de documentos en que fue usado se propone una codificación de la solución que divide el cromosoma en dos sub cadenas, estado del depósito y secuencias de clientes. Se observa que se impone un enfoque heurístico para generar la poblacional inicial.

Tabla 1. Síntesis de literatura sobre el Location-Routing Problem LRP aplicado a gestión de desastres.

AUTOR	Objetivos						Método de solución		Tipo de desastre		Tipo de flota		Restricciones		Test
	T	C	CF	R	D	F	Heu	Ext	NT	TD	HO	HE	CAP	otras	
Yi and Özdamar (2007)					x		x		x			x			CS
Ukkusuri and Yushimito, (2009)			x					x		x	x			Presupuesto	Acad
Alçada-Almeida et al. (2009)	x			x			x		x				x		CS
Mingang et al. (2009)		x					x		x		x				Acad
Coutinho-Rodrigues et al., (2012)	x			x		x		x		x			x	Longitud	CS
Hua-li et al.,(2012)	x	x					x				x				Acad
Li et al., (2014)	x	x					x		x		x				Acad
Goerigk et al., (2014)	x			x		x	x			x	x				CS
Abounacer et al., (2014)	x				x			x				x			Acad
Wang et al., (2014)	x	x	x				x		x			x			CS
Pramudita et al., (2014)		x					x		x		x				CS
Li and Zhou (2014)	x						x		x			x		Tiempo	Acad
Rath and Gutjahr (2014)		x			x		x			x			x	Presupuesto	Acad
Ahmadi et al., (2015)	x	x			x		x		x		x				CS

**Objetivos-** T: Tiempo, C: costo, CF: confiabilidad, R: riesgo, D: demanda, F: # de instalaciones. **Método de solución-**Heu: Heurístico, Ext: Exacto.

**Tipo de desastre-** NT: Natural, TD: Todo tipo de desastre. **Tipo de flota-**HO: Homogénea, HE: Heterogénea. **Restricciones-**CAP: capacidad de la instalación o de la flota. **Test-** CS: Caso de estudio, Acad: Académico.

Asimismo, a pesar que el LRP en logística humanitaria ha sido solucionado a través de algoritmos evolutivos, no se encontró evidencias publicadas del uso de algoritmos meméticos como enfoque de solución para el LRP en procesos de evacuación en desastres por sismos o terremotos; aun cuando este método ha sido usado con éxito en diferentes áreas y diversos problemas de optimización combinatoria. Además, de acuerdo a la revisión de literatura, no se encontraron publicaciones que indiquen que en Colombia se ha abordado la localización de albergues y el diseño de rutas de evacuación a partir de técnicas de investigación de operaciones.

Tabla 2. Uso de algoritmo memético en LRP y variantes.

Tipo de Problema	Codificación solución	Generación población inicial	Componentes MA
CLRP (Prins, Prodhon, & Wolfler Calvo, 2006)	DS –CS	Heurística constructiva y heurística aleatoria voraz basada en ECWA	MA/MP Operadores evolutivos + Búsqueda local +Gestión de la población
PLRP (Prodhon & Prins, 2008)	DS-CS	Aleatoria	MA/PM Operadores Evolutivos + Búsqueda local + Gestión de la población.
CLRP (Duhamel, Lacomme, Prins, & Prodhon, 2008)	CS	Heurísticas	Heurística generación inicial+ búsqueda local + Cruce eficiente + procedimiento de división
PLRP (Prodhon, 2011)	-	Aleatorio	Búsqueda local evolutiva + RECWA
HDM-LRP (Yildiz, Johnson, & Roehrig, 2012)	F-R	Heurística voraz y enfoque de NNA	GA + Heurística TSP
CLPRMB (Karaoglan & Altiparmak, 2014)	DS-CS	ECWA y aleatorias	GA+SA+IPF

**Tipo de problema**-CLRP: Capacitated Location-Routing, PLRP: Periodic Location-Routing Problem, HDM-LRP: Home Delivered Meals Location-Routing Problem., CLRPMB: Capacitated Location-Routing Problem with Mixed Backhauls. **Codificación**- DS: Depot Status, CS: Customers Sequence, NNA: Nearest Neighbor Algorithm, ECWA: Extended Clarke and Wright saving Algorithm, F-R: Facility-Route. **Componentes**- MA/PM: Memetic Algorithm with Population Management RECWA: Randomized Extended Clarke and Wright Algorithm, GA: Genetic Algorithm, TSP: Travel Salesman Problem, SA: Simulated Annealing, IPF: Integer Programming Formulation

## 2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El LRP, hace parte del análisis de localización de instalaciones, con la característica de que se centra en la interdependencia entre las decisiones de localización y las decisiones de ruteo de vehículos (Hassanzadeh et al., Mohseninezhad, Tirdad, Dadgostari, & Zolfagharinia, 2009). Para solucionar el LRP es necesario solucionar un problema de localización de instalaciones (FLP) y el problema de ruteo de vehículos (VRP) y estos últimos pueden ser visto como casos especiales del LRP. Si cada cliente es vinculado directamente a un depósito, entonces el LRP se convierte en un problema de localización clásico. Por otro lado, si los depósitos están localizados, el LRP se reduce a un VRP (Nagy & Salhi, 2007). El LRP es un problema complejo debido a dos argumentos principalmente, el primero es que es considerado un problema combinatorio NP-Hard, al estar compuesto por dos problemas que entran en esa categoría (Cornuejols, Fisher, & Nemhauser, 1977; Karp, 1972), lo cual lo hace difícil de resolver a medida que se incrementa el número de variables involucradas en el modelo. El segundo está relacionado a las diferentes decisiones que deben ser tomadas en el modelo ¿Cuántas instalaciones ubicar?, ¿Dónde se deben ubicar las instalaciones?, ¿Qué clientes asignar a las instalaciones?, ¿En qué orden los clientes debe ser servidos en cada ruta?

Existen diferentes variantes del LRP, en esta investigación se aborda un LRP con restricciones de capacidad sobre los depósitos conocido como CLRP. La red diseñada para el problema investigado puede ser definida como sigue. La red  $G(N, A)$  es un grafo completo donde  $N = N_0 \cup N_c$  es el conjunto de todos los nodos, donde  $N_0$  y  $N_c$  representan los nodos de potenciales albergues y de clientes respectivamente. El conjunto  $A = \{(i, j) : i, j \in N\}$  es el conjunto de arcos que representan las conexiones viales entre los nodos. Cada arco  $(i, j)$  tiene asociado un costo no negativo (tiempo)  $t_{ij}$  con  $t_{ij} \neq t_{ji}$  para cada  $i, j \in N$  y se mantiene la desigualdad triangular (es decir,  $t_{ij} + t_{jk} \geq t_{ik}$ ). Cada nodo albergue  $k \in N_0$  tiene

asociada una capacidad  $CD_k$  (número de personas que pueden ser albergadas en la instalación) y un parámetro  $r_k$  que representa el estado del daño en la instalación de acuerdo a la zona donde se encuentra ubicada. Cada nodo cliente tiene una demanda  $d_i$  que representa el número de personas que requieren refugiarse en albergues temporales,  $d_i$  obedece a un enfoque de agregación de demanda. Un número limitado de vehículos homogéneos con capacidad conocida  $CV$  están disponibles en cada albergue. El problema es determinar la localización de los albergues, la asignación de los clientes a los albergues abiertos y la ruta de evacuación minimizando el tiempo de viaje y maximizando la confiabilidad de los albergues abiertos, sujeto a las siguientes restricciones:

- 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

Se formulan las siguientes variables de decisión para el CLRP multiobjetivo.

$x_{ij}$ : 1 si un vehículo viaja directamente de  $i$  a  $j$  ( $\forall i, j \in N$ ); 0 en caso contrario.

$y_k$ : 1 si el albergue  $k$  es habilitado ( $\forall k \in N_0$ ); 0 en caso contrario

$z_{ik}$ : 1 si el nodo cliente  $i$  es asignado al albergue  $k$  ( $\forall i \in N_c, \forall k \in N_0$ ); 0 en caso contrario.

La formulación matemática del problema es como sigue:

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ij} t_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Min} \sum_{k \in N_0} y_k r_k \quad (2)$$

$$s.a. \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N_c \quad (4)$$

$$\sum_{k \in N_0} z_{ik} = 1 \quad \forall i \in N_c \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N_c} d_i z_{ik} \leq CD_k y_k \quad \forall k \in N_0 \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N_c} d_i x_{ij} \leq CV \quad (7)$$

$$x_{ik} \leq z_{ik} \quad \forall i \in N_c, \forall k \in N_0 \quad (8)$$

$$x_{ki} \leq z_{ik} \quad \forall i \in N_c, \forall k \in N_0 \quad (9)$$

$$x_{ij} + z_{ik} + \sum_{m \in N_0, m \neq k} z_{jm} \leq 2 \quad \forall i, j \in N_c, i \neq j, \forall k \in N_0 \quad (10)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (11)$$

$$z_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N_c, \forall k \in N_0 \quad (12)$$

$$y_k \in \{0,1\} \quad \forall k \in N_0$$

En esta formulación la función objetivo (1) minimiza el tiempo de viaje total de los clientes a los albergues; es decir el tiempo total de evacuación, y la función (2) maximiza de la confiabilidad total de los albergues habilitados, minimizando la suma de los índices de vulnerabilidad sísmica asociado a estos. En esta investigación la confiabilidad es entendida como la probabilidad de falla de una estructura tomando en cuenta la incertidumbre asociada a la resistencia. El conjunto de restricciones (3) y (4) son conocidos como restricciones de grado. La restricción (3) asegura que cada cliente puede ser visitado una sola vez, mientras que la restricción (4) implica que cada nodo cliente es asignado a un único albergue. La restricción (5) asegura que la capacidad del albergue no es excedida por la demanda de los clientes asignados a este. La restricción (6) asegura que la capacidad del vehículo no sea excedida por la demanda asignada a la ruta. El conjunto de restricciones (7)-(9) evitan las rutas ilegales, es decir, rutas que no empiezan y terminan en el mismo

albergue. Finalmente el conjunto de restricciones (10)-(12) se conocen como las restricciones de integralidad, que definen la naturaleza de las variables de decisión.

El modelo propuesto tiene en cuenta los siguientes supuestos:

- Un nodo cliente está compuesto por la demanda agregada de varios puntos de demanda, y la demanda de cada nodo es conocida.
- El conjunto de potenciales albergues es conocido y cada instalación cumple con criterios para ser parte de este conjunto.
- Una ruta está compuesta por segmentos de ruta. Cada nodo de cliente está conectado a su albergue por una o más rutas y puede compartir segmentos de rutas con otros nodos clientes. La elección de la ruta es realizada por el algoritmo.

### 3 OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO

Muchos problemas reales suelen necesitar la optimización de múltiples objetivos a la vez, que generalmente están en conflicto entre sí. La tarea de encontrar una o más soluciones óptimas se denomina optimización multiobjetivo o toma de decisiones multicriterio. Bajo este enfoque todos los objetivos del problema deben ser considerados. Ya no se busca una solución óptima, sino un conjunto de soluciones posibles de calidad equivalente. El espacio de búsqueda se convierte en parcialmente ordenado, donde existe un conjunto de soluciones *trade-offs* óptimas entre los objetivos conflictivos, que puedan ser aceptadas por el tomador de decisiones

Un problema de optimización multiobjetivo (MOP) es aquel que incluye un conjunto de  $n$  variables de decisión, un conjunto de  $k$  funciones objetivo, y un conjunto de  $m$  restricciones de desigualdad y  $p$  restricciones de igualdad, en donde las funciones objetivo y las restricciones son funciones de las  $n$  variables de decisión. En su forma general, un MOP puede ser expresado matemáticamente como (Dias & de Vasconcelos, 2002)

$$\text{Optimizar } y = f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\} \quad (12)$$

$$\text{Sujeto a } g(x) = \{g_1(x), g_2(x), \dots, g_m(x)\} \geq 0 \quad (13)$$

$$h(x) = \{h_1(x), h_2(x), \dots, h_p(x)\} = 0 \quad (14)$$

$$\text{donde } x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \in X \quad (15)$$

$$y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\} \in Y \quad (16)$$

Donde  $x$  representa el vector de decisión,  $X$  denota el espacio de decisión,  $y$  representa el vector objetivos y el espacio objetivo es denotado por  $Y$ .

**Definición 1: Dominancia de Pareto.** Considerando todos los objetivos, sea  $x_1$  y  $x_2$  una pareja de soluciones factibles al problema descrito en (12)-(16). Si la solución  $x_1$  es al menos igual a  $x_2$ , y mejor que  $x_2$  en al menos un valor objetivo, la solución  $x_1$  domina a la solución  $x_2$  (denotado como  $x_1 \succ x_2$ ). En términos formales, para un problema de minimización de múltiples objetivos  $(f_1, \dots, f_k)$ , la solución  $x_1$  domina a la solución  $x_2$  y se escribe  $x_1 \succ x_2$ , si y solo si

$$(\forall i \in \{1, 2, \dots, k\} : f_i(x_1) \leq f_i(x_2)) \wedge (\exists i' \in \{1, 2, \dots, k\} : f_{i'}(x_1) < f_{i'}(x_2)) \quad (12)$$

**Definición 2: Óptimo de Pareto.** Una solución  $x_1$  es llamada solución óptima de Pareto o no-dominada si y solo si no hay ninguna solución  $x_2$  que satisfice  $x_2 \succ x_1$ .

**Definición 3: Frente de Pareto.** Si  $x_1$  es un óptimo de Pareto (no-dominado) entonces  $f(x_1) = \{f_1(x_1), \dots, f_k(x_1)\}$  se dice que es un vector no-dominado. El conjunto de todos los vectores no dominados se llama Frente de Pareto (o frontera no dominada).

## 4 ALGORITMO MEMÉTICO PARA LA SOLUCIÓN DEL LRP

El LRP es un problema de tipo NP-Hard; por lo tanto, métodos heurísticos son más adecuados para obtener soluciones rápidamente a este problema.

En la optimización combinatoria, algoritmos genéticos clásicos (GA), no son suficientemente agresivos, en comparación con otras metaheurísticas como la búsqueda tabú. Los algoritmos meméticos (MA) propuestos por Moscato, (1999) son versiones más potentes, en el que la intensificación se realiza mediante la aplicación de un procedimiento de mejora (búsqueda local) a nuevas soluciones. La idea principal de los MA está fundamentada en las mejoras individuales de las soluciones agentes (soluciones al problema aunado al mecanismo de mejora local) que se interrelacionan entre sí en un proceso que contiene fases de cooperación y competición de tipo poblacional (Moscato & Cotta, 2010). En esta investigación se propone un algoritmo memético para la solución del CLRP multiobjetivo. El MA propuesto está compuesto por dos enfoques, un algoritmo evolutivo multiobjetivo NSGA II y un procedimiento de búsqueda local realizado mediante movimientos de mejora. En esta sección se presenta la descripción detallada de los componentes del algoritmo propuesto para la solución del CLRP.

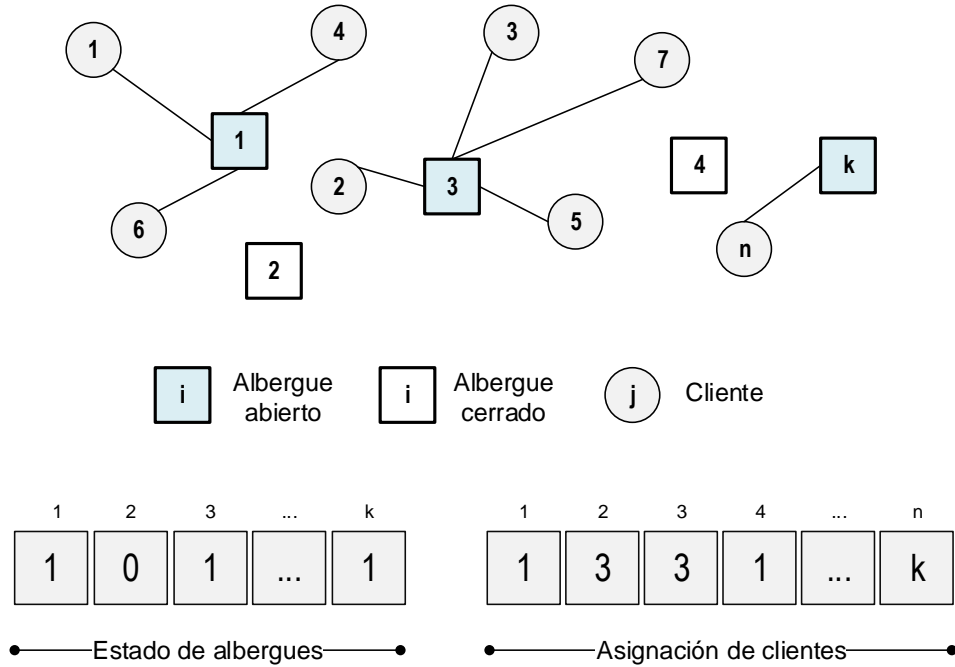
### 4.1 NSGA II

Para abordar la multi-objetividad del problema se usa un NSGA II (*Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*) propuesto por Deb et al., (2000).

#### 4.1.1 Población inicial

En esta investigación se utiliza una codificación con números naturales para representar las soluciones del NSGA II para el LRP. Cada cromosoma consiste de dos sub cadenas, como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Esquema de codificación de la solución



La primera sub cadena es una malla binaria que corresponde al estado de los  $k$  albergues, donde el valor del gen en la  $i$ -ésima posición indica si el albergue  $i$  está abierto (valor de 1) o cerrado (valor de 0). Esta codificación binaria únicamente considera si el deposito está abierto o cerrado (variable  $y_k$  en la sección 2). Esta sub cadena es generada aleatoriamente. En cada cromosoma se verifica un criterio de capacidad ( $\Gamma$ ),  $\Gamma = \sum_{k \in N_0} CD_k y_k$ , si  $\Gamma \geq \sum_{i \in N_c} d_i$  se asegura que se habiliten los albergues necesarios para satisfacer la demanda. En el caso de que  $\Gamma < \sum_{i \in N_c} d_i$ , en ese cromosoma se elige aleatoriamente un gen con valor 0 (albergue cerrado) y se cambia su valor a 1 (albergue abierto), ésto se realiza hasta que se cumpla el criterio de capacidad  $\Gamma$ .

A partir de la sub cadena de estado de los albergues, se genera la segunda sub cadena que corresponde a la asignación de los nodos clientes a los albergues habilitados. Esta sub cadena es una permutación con repetición, donde el valor del gen en la  $j$ -ésima posición indica el albergue al que ha sido asignado el cliente  $j$ . Para realizar la asignación, se utiliza la heurística del vecino más cercano sobre los

albergues habilitados, evitando que se viole la restricción de capacidad y que clientes muy lejanos a un albergue sean asignados a este, al tiempo que se crean las secuencias de visita, las rutas que se generan en cada solución son almacenadas. Este procedimiento siempre genera soluciones factibles ya que asegura el cumplimiento de las restricciones del problema

El procedimiento para generar un cromosoma se repite hasta que el tamaño  $N$  de la población  $P_t$  esté completo. Donde  $N$  es el número de individuos de la población y  $t$  el número de generaciones, con  $t = 0$  para población inicial  $P_0$ .

#### **4.1.2 Operadores de cruce y mutación**

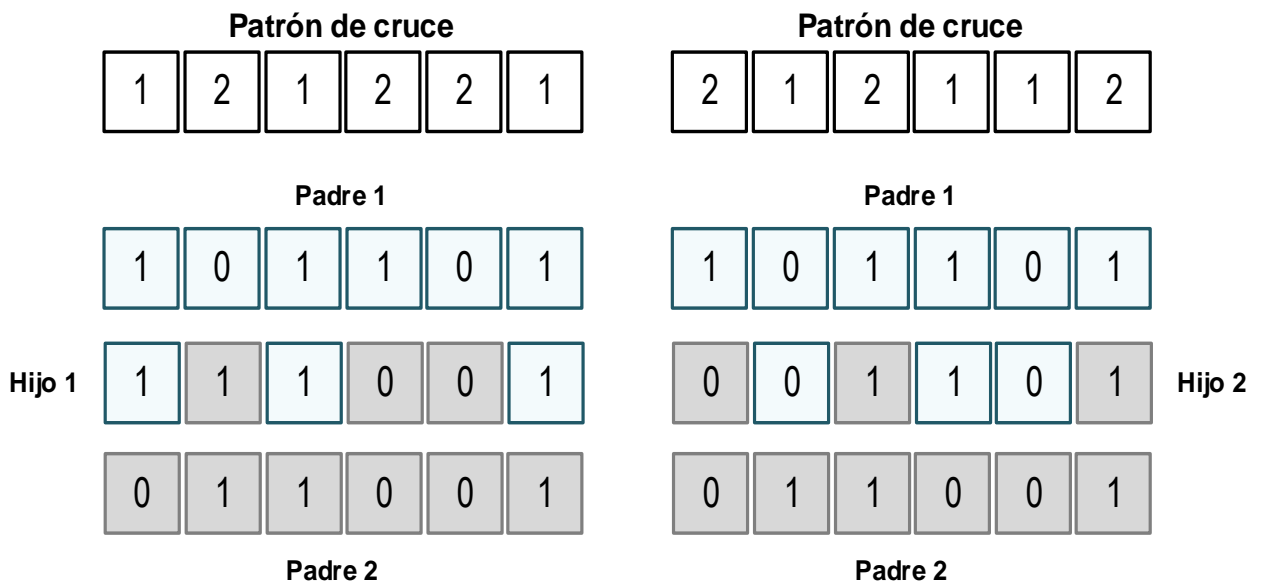
El operador de cruce es ejecutado para producir nuevos descendientes a partir de las soluciones de la población actual. En esta investigación se utiliza el operador de cruce uniforme (Michalewicz, 1996), el cual se opera únicamente sobre la sub cadena binaria correspondiente al estado de los albergues. Las soluciones de la población actual  $P_t$ , son seleccionadas en parejas para convertirse en padres, cada pareja solo puede ser cruzada una vez. Para la operación de cruce se genera de forma aleatoria un patrón del tamaño de la sub cadena en la que cada gen puede tomar el valor de 1 o 2. Si el  $i$ -ésimo gen en el patrón toma el valor de 1, el valor que corresponda a esa misma posición en el sub cadena del padre 1 se hereda al hijo, si el valor en el patrón es 2, entonces el gen se hereda del padre 2. Un segundo patrón es generado automáticamente mediante un cambio del valor de cada gen en el patrón actual, y el procedimiento anterior se realiza para generar un segundo descendiente.

Este operador genera dos soluciones descendientes. En estas nuevas soluciones la sub cadena de clientes es creada a partir de la sub cadena de albergues como se explicó en el ítem anterior. Como todos los individuos de  $P_t$  son elegidos para el cruce, un total de  $N$  cromosomas hijos son generados y constituyen la población  $Q_t$

de descendientes. En la figura 2 se presenta un esquema del operador de cruce uniforme usado.

Se utiliza un operador de mutación con el propósito de diversificar la población mediante la modificación arbitraria de algunos genes usando una distribución de probabilidad, su objetivo es evitar que la solución converja a un óptimo local. Este operador se ejecuta únicamente sobre la población de descendiente. Para cada individuo de la población descendiente  $Q_t$  se genera aleatoriamente un valor entre 0 y 1, si este valor es menor que  $P_m$  (parámetro de probabilidad de mutación), un gen del cromosoma es elegido aleatoriamente y mutado de 0 a 1, o de 1 a 0 según corresponda. Al finalizar el proceso mutación, el criterio de capacidad  $\Gamma$  debe ser evaluado, en caso de que no se cumpla, se realiza el procedimiento explicado en el ítem anterior.

Figura 2. Ejemplo del operador de cruce



#### 4.1.3 Operador de selección

El operador de selección usado en el NSGA II es propuesto por (Deb et al., (2002). El procedimiento de este operador es el siguiente: Primero se combinan la población

actual de padres  $P_t$  con la de hijos  $Q_t$  generando una población  $R_t$  de tamaño  $2N$ , cada individuo en  $R_t$  es evaluado mediante su función *fitness*. Segundo, el enfoque de ordenamiento rápido no dominado es usado en  $R_t$  para obtener los frentes de Pareto  $F_1, F_2, F_3, \dots$  y clasificar las soluciones en ellos. Tercero, sea  $S_i$  el número de individuos en  $F_i$ , y se encuentran  $r$  rangos de frente no dominado, que satisface

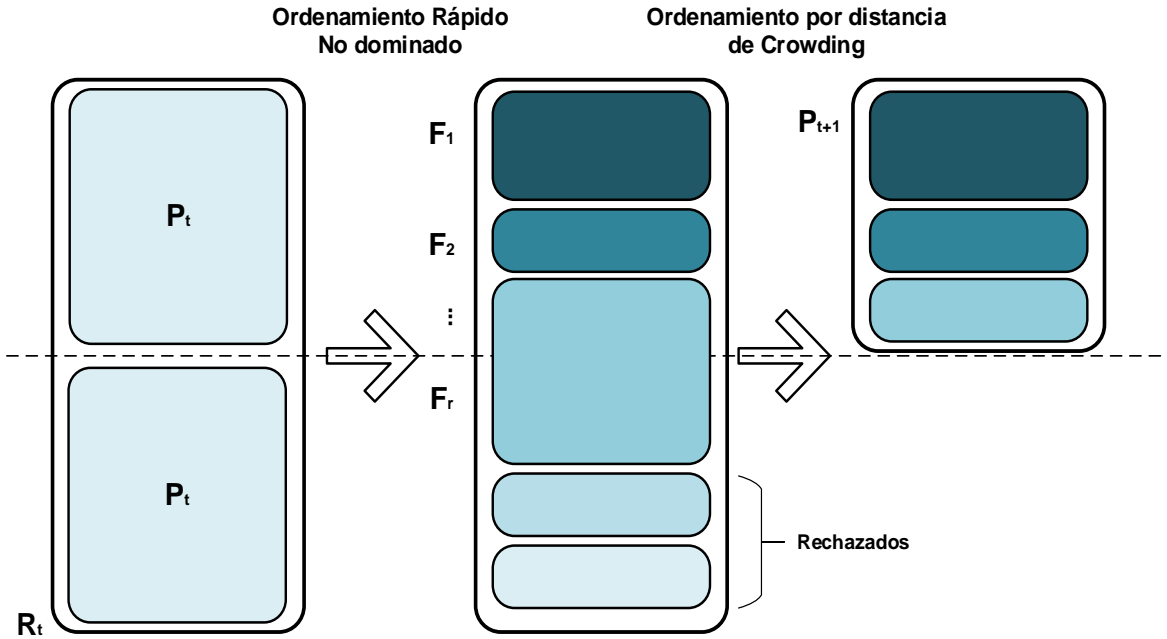
$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{r-1} S_i \leq N \\ \sum_{i=1}^r S_i \geq N \end{cases} \quad (13)$$

Se calcula la distancia de *crowding* para los individuos en el frente  $F_r$ . Con base a ese valor son ordenadas las soluciones de ese frente en orden descendente. Finalmente, los individuos en los rangos desde  $F_1$  a  $F_{r-1}$ , y los primeros  $N - \sum_{i=1}^{r-1} S_i$  individuos en  $F_r$  son seleccionados para ser parte de la siguiente generación  $P_{t+1}$ . El esquema conceptual del proceso de selección se presenta en la figura 3.

#### 4.1.3.1 Ordenamiento Rápido No dominado

El ordenamiento no dominado, busca ordenar a los individuos de la población actual de acuerdo a su nivel de no dominancia, clasificándolos en frentes de soluciones no dominadas para asignarles un rango. El frente 1 ( $F_1$ ) es creado con todas las soluciones no dominadas de la población actual, en el segundo frente ( $F_2$ ) se ubican las soluciones no dominadas en ausencia o remoción de las soluciones que pertenecen a  $F_1$ , y así sucesivamente hasta que todos los individuos de la población han sido clasificados.

Figura 3. Funcionamiento operador de selección basado en Deb et al., (2002)



En esta investigación se utiliza el enfoque de ordenamiento no dominado propuesto por Deb et al., (2002). Para aumentar la eficiencia de su método reduciendo el número de comparaciones a  $O(MN^2)$  donde  $N$  es el tamaño de la población y  $M$  el número de objetivos; los autores proponen que para cada solución se calculan dos entidades: 1) un contador de dominación  $np$  número de soluciones que dominan a la solución  $p$  y 2)  $S_p$ , conjunto de soluciones que son dominadas por la solución  $p$ . Todas las soluciones en el primer frente no dominado tendrán un valor  $np = 0$ , para cada solución  $p$  con  $np = 0$ , cada miembro  $q$  de su conjunto  $S_p$  se le reduce el valor de  $np$  en 1. De este modo, si para cualquier miembro  $q$  su valor de  $np$  llega a ser cero, es puesto en una lista separada  $Q$ , estos miembros pertenecen al segundo frente no dominado. El procedimiento anterior se continúa con cada miembro de  $Q$  y el tercer frente es identificado. Este proceso se continúa hasta que todos los frentes son identificados. El pseudocódigo de este enfoque se presenta en el cuadro 1.

#### 4.1.3.2 Ordenamiento por distancia de *crowding*

Para preservar la diversidad, la distancia de *crowding*, la distancia normalizada a los vecinos más cercanos en el espacio objetivo, se calcula para estimar la densidad de la solución que rodea a una solución particular de la población. Se considera que cada solución tiene dos atributos, 1) un rango de no dominancia  $i_{rank}$  y una distancia de *crowding*  $D_i$ . Por medio de esos dos parámetros se seleccionan los individuos, se comparan dos soluciones  $i$  y  $j$  así:

$$\begin{aligned} i \succ j & \text{ si } (i_{rank} < j_{rank}) \\ & \text{o } ((i_{rank} = j_{rank})) \\ & \text{y } (D_i > D_j) \end{aligned}$$

Según lo anterior, entre dos soluciones con diferentes rangos de no dominancia, se elige la solución con el menor rango, mientras que, si las soluciones comparadas pertenecen al mismo frente, se elige la solución que se encuentra en la región menos llena, es decir, con mayor distancia de *crowding*.

La distancia de *crowding* de una solución  $i$ , es la medida del espacio de búsqueda alrededor de  $i$  que no está ocupado por otra solución en la población. La distancia de *crowding*  $D_i$  para cada solución  $i$ , es determinada algorítmicamente haciendo uso del algoritmo ilustrado en el cuadro 2. Donde  $f_m^{max}$ ,  $f_m^{min}$  son los valores máximo y mínimo de la función objetivo  $m$ ;  $f_m^{(I_{i+1}^m)}$  y  $f_m^{(I_{i-1}^m)}$  son las soluciones vecinas a la configuración  $i$  para cada una de las funciones objetivo  $m$ . El valor de comparación  $D_i$  corresponderá a la suma de las distancias de cada objetivo  $m$  para la solución  $i$

Cuadro 1. Pseudocódigo del enfoque de ordenamiento rápido no dominado propuesto por Deb et al. (2002)

---

```

Ordenamiento rápido no dominado (P)
1 for cada  $p \in P$ 
2    $S_p = \emptyset; n_p = 0$ 
3   for cada  $q \in P$ 
4     if ( $p \succ q$ ) entonces // p domina a q
5        $S_p = S_p \cup \{q\}$  // Agrega q al conjunto de soluciones dominadas por p
6     else if ( $q \succ p$ ) entonces
7        $n_p = n_p + 1$  // incrementa el contador de dominancia de p
8     fin if
9   fin for
10  if  $n_p = 0$  entonces
11     $p_{rank} = 1$  // p pertenece al primer frente
12     $F_1 = F_1 \cup \{p\}$ 
13  fin if
14   $i = 1$ 
15  while  $F_i \neq \emptyset$ 
16     $Q = \emptyset$  // usando para almacenar los miembros del proximo frente
17    for cada  $p \in F_i$ 
18      for cada  $q \in S_p$ 
19         $n_q = n_q - 1$ 
20        if  $n_q = 0$  entonces // q pertenece al proximo frente
21           $q_{rank} = i + 1$ 
22           $Q = Q \cup \{q\}$ 
23        fin if
24      fin for
25    fin for
26     $i = i + 1$ 
27     $F_i = Q$ 
28  fin while
29 fin for // este proceso continúa hasta que todos los frentes son identificados

```

---

Cuadro 2. Pseudocódigo del enfoque de ordenamiento por distancia de *crowding* propuesto por Deb et al., (2002)

---

```

Ordenamiento por distancia de crowding
1   $I = |F_c|$  // Número total de soluciones en el frente
2  for cada  $i$ 
3     $D_{I_i^m} = 0$  // inicializar distancias
4  fin for
5  for cada objetivo  $m$ 
6    Ordenar  $F_c$  de acuerdo al  $m$  objetivo
7     $D_{I_1^m} = D_{I_I^m} = \infty$  // los extremos de cada frente  $F_c$  siempre son seleccionados
8    for todo  $I=2$  a  $(I-1)$  // para todos los otros puntos
9       $D_{I_i^m} = D_{I_i^m} + \frac{f_m^{(I_{i+1}^m)} - f_m^{(I_{i-1}^m)}}{f_m^{max} - f_m^{min}}$ 
10   fin for
11  fin for

```

---

## 4.2 BÚSQUEDA LOCAL

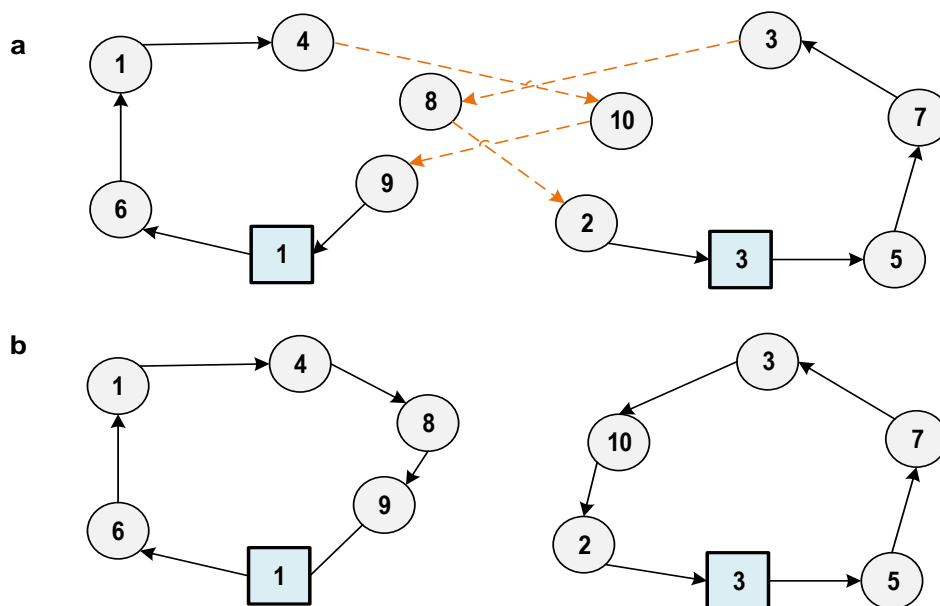
En cada generación del algoritmo memético se aplica un procedimiento de búsqueda local. La idea principal de la aplicación del algoritmo de búsqueda local es realizar una búsqueda en los espacios de solución potenciales, que han sido generadas inicialmente. La búsqueda local se realiza únicamente sobre los individuos de la población  $Q_t$ . El algoritmo de búsqueda local incluye dos movimientos de mejora denominados *swap* e inserción, adaptados de los presentados en (Karaoglan & Altıparmak, 2014), que se ejecutan sobre la subcadena de asignación de clientes.

### 4.2.1 Swap

Para cada solución de la población  $Q_t$  se selecciona el primer y segundo albergue con el peor valor de la función de tiempo. En cada uno de esos albergues, se identifica el último cliente asignado. Estos clientes se intercambian entre estos dos

albergues, verificando que la capacidad del albergue no ha sido violada. En el caso en que el segundo albergue no pueda recibir otro nodo sin exceder su capacidad, se elige el siguiente peor albergue, hasta que el cliente pueda ser intercambiado. Puede suceder, que ningún albergue tenga capacidad para recibir el cliente, se realiza un intercambio interno en la misma ruta de peor albergue. La figura 4 es un ejemplo del operador *swap*, en esta figura los clientes 8 y 10 fueron removidos de su posición actual (Figura 4a) e intercambiados (Figura 4b).

Figura 4. Ejemplo del movimiento *swap*



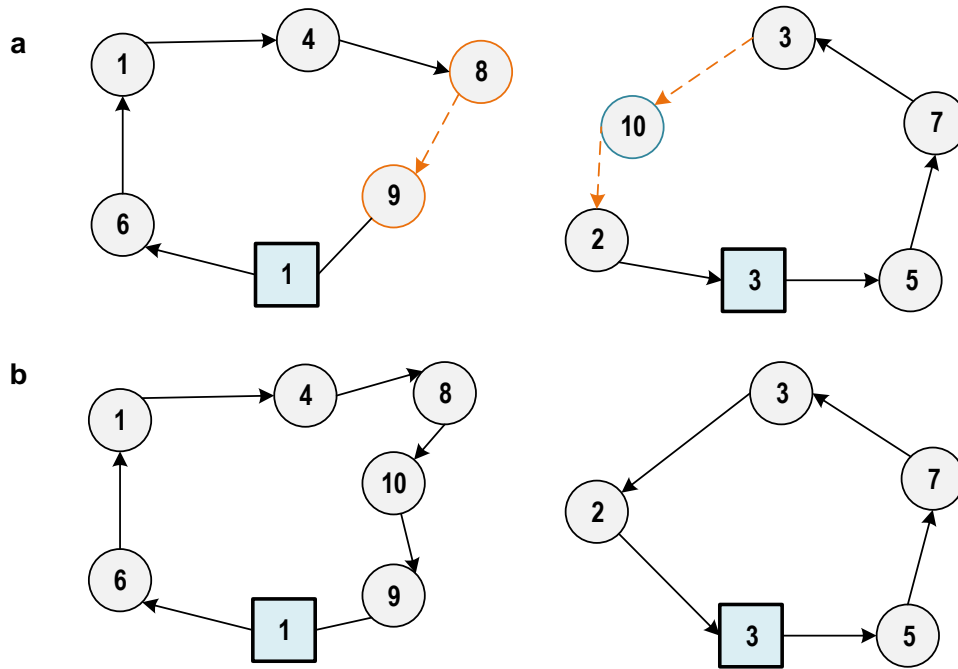
#### 4.2.2 Inserción

En la operación de inserción se siguen los mismos pasos que los planteados para el movimiento *swap* con la diferencia que los clientes no son intercambiados, sino que se elige aleatoriamente dos nodos consecutivos entre los cuales se inserta el nodo cliente del otro albergue.

El procedimiento del operador de inserción es ilustrado en la figura 5. En el albergue 1 los nodos 8 y 9 son elegidos aleatoriamente y el cliente 10 del albergue 3 es quien será insertado entre ellos (Figura 5a). El cliente 10 es removido de su ruta actual e

insertado entre los dos nodos consecutivos elegidos (Figura 5b) creando una nueva ruta.

Figura 5. Ejemplo del movimiento de Inserción



### 4.3 PROCEDIMIENTO DEL ALGORITMO MEMÉTICO PROPUESTO

Con base en las operaciones discutidas anteriormente, el procedimiento del algoritmo memético propuesto en ese estudio puede ser resumido como sigue:

*Paso 1.* Generar una población de padres  $P_t$  de tamaño  $N$ . La población inicial  $P_0$  ( $t = 0$ ) es generada aleatoriamente.

*Paso 2.* Sobre la población  $P_t$  se ejecutan los operadores de cruce y mutación y se genera la población descendiente  $Q_t$  de tamaño  $N$ .

*Paso 3.* Se ejecuta el procedimiento de búsqueda local sobre los individuos de  $Q_t$ .

*Paso 4.* La población de padres  $P_t$  y de hijos  $Q_t$ , se combinan para formar la población  $R_t$ . Calcular el valor objetivo para cada cromosoma de  $R_t$ .

*Paso 5.* Clasificar todos los individuos en  $R_t$  en diferentes rangos con base en el enfoque de ordenamiento rápido no dominado.

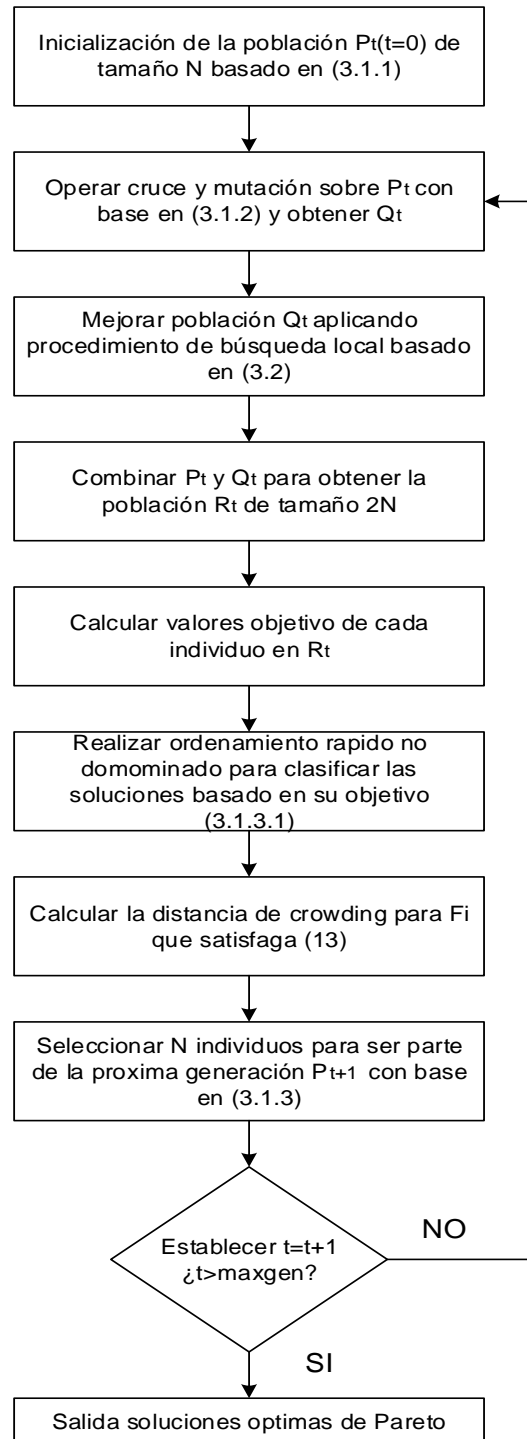
*Paso 6.* Calcular la distancia de *crowding* para cada individuo en un frente cualquiera  $F$  de  $R_t$ . Luego ordenar todos los individuos en el frente  $F$  en orden descendente de acuerdo al valor de la distancia.

*Paso 7.* Seleccionar los mejores  $N$  individuos con base en el rango y distancia de *crowding*. Estos  $N$  individuos actuarán como la población padre en la siguiente generación.

*Paso 8.* Detener el algoritmo si el criterio de parada se ha cumplido  $t > maxgen$ , con  $maxgen$  como el máximo número de generaciones, sino regresar al paso 2.

El diagrama de flujo del MA es ilustrado en la figura 6.

Figura 6. Diagrama de flujo del algoritmo memético propuesto.



#### 4.4 VALIDACIÓN DEL ALGORITMO MEMÉTICO

En vista de que los problemas en desastres son únicos, no se encuentra en la literatura instancias específicamente diseñadas para el problema abordado en esta investigación. Por esto, para evaluar el desempeño del algoritmo memético y validarlo, se utilizaron 8 instancias de Prodhon (2006) para el LRP capacitado, consultadas en [http://prodhonc.free.fr/Instances/instances\\_us.htm](http://prodhonc.free.fr/Instances/instances_us.htm).

Los datos principales de las instancias usadas son:

- Nombre de depósitos:  $m \in \{5,10\}$
- Nombre de clientes:  $n \in \{20,50,100,200\}$
- Capacidad fija de los vehículos:  $Q \in \{75,150\}$
- Capacidad de depósitos  $W$ , la cual varía de acuerdo a la instancia.

Las instancias de Prodhon (2006) son mono objetivo y la función *fitness* es el costo total, que comprende la suma de los costos de la ruta en distancias y el costo de apertura de los depósitos, por lo cual para usar el NSGA II la función de costo total fue evaluada en sus dos componentes, costo de depósitos y costo de las rutas, como si cada uno de ellos fuese un objetivo individual del problema.

Un conjunto de experimentos computacionales se corrieron sobre las instancias elegidas para determinar las mejores combinaciones de los parámetros relacionados al tamaño de la población ( $N$ ) y el número de generaciones ( $t$ ), la probabilidad de mutación fue fijada en 0.1. El algoritmo memético fue implementado en el lenguaje de programación Go (Código libre desarrollado por Google). Los test fueron ejecutados en un maquina con procesador Intel Core i5 de 64 Bits, 3.1 GHz y 8 GB de memoria RAM. Cada uno de los *test* fue corrido 5 veces.

En la tabla 3 se presenta la mejor solución conocida (BKS) junto a los resultados obtenidos por Prins et al., (2006) implementando un algoritmo memético con gestión de la población (MAPM) en estas mismas instancias, y las soluciones con menor

*Gap* respecto al BKS obtenidas con el método propuesto en el presente trabajo, con el propósito de realizar una comparación entre los dos métodos.

Los resultados indican que el algoritmo memético propuesto puede llegar a ser tan eficiente como el MAPM para algunos problemas. En la mayoría de casos el algoritmo memético habilita el mismo número de albergues y usa la misma cantidad de vehículos que en el MAPM; sin embargo, aun obteniendo el mismo costo de depósitos, no logra igualar el costo de la ruta. Por otra parte, el algoritmo validado obtuvo valores de *gap* por debajo del 5% en 6 de las 8 instancias, en el problema 20-5-1a (20 clientes, 5 depósitos), encontró una solución mejor que el BKS actual; sin embargo, no llegó al BKS en 7 de los test, y en dos de las instancias el *gap* supera el 10%.

Los tiempos computacionales para obtener los resultados son razonables, se evidenció que el tiempo de cálculo se ve afectado principalmente por el tamaño de la población, no se requirió un gran número de individuos (máximo 300) para obtener soluciones aceptables, y sí un número de iteraciones de al menos 100. No se realizó una comparación con los tiempos de cómputo de Prins et al., (2006), ya que las condiciones del equipo de prueba son diferentes.

Tabla 3. Resultados de la validación del algoritmo memético en instancias del LRP capacitado

Instancia	BKS	MAPM (Prins et al., 2006)					MA PROPUESTO					CPU(s)	Gap/ MAPM	Gap/ BKS
		Costo Total	nb dep	nb veh	Cd	Cr	Costo Total	nb dep	nb veh	Cd	Cr			
20-5-1a	54793	54793	3	5	25549	29244	53692	3	5	25549	28143	13.87	-2.01	-2.01
20-5-1b	39104	39104	2	3	15497	23607	45893	2	3	15497	30396	5.36	17.36	17.36
50-5-1a	90111	90160	3	12	25442	64718	90198	3	12	25442	64756	40.06	0.04	0.10
50-5-1b	63242	63242	2	6	15385	47857	72851	2	6	15385	57466	2.98	15.19	15.19
100-5-1a	274814	281944	3	24	144012	137932	283148	3	24	132890	150258	19.57	0.43	3.03
100-5-1b	213568	214885	3	11	132890	81995	220399	3	11	132890	87509	168.44	2.56	3.20
200-10-1a	479425	483497	3	47	266151	217346	492296	3	46	263746	228550	216.6	1.82	2.68
200-10-1b	378773	380044	3	22	253840	126204	387268	3	22	250048	137220	19.37	1.90	2.24

**nb dep** : Número de depósitos abiertos, **nb veh**: Número de vehículos usados, **Cd**: Costo de los depósitos, **Cr**: Costo de la ruta, **CPU(s)**: Tiempo computacional en segundos para hallar la respuesta con menor *gap*.

## 5 CASO DE ESTUDIO

Para evaluar la validez del modelo propuesto, un estudio de caso se lleva a cabo para la planificación de albergues y rutas de evacuación en la ciudad de Bucaramanga (Santander, Colombia).

### 5.1 DESCRIPCIÓN DEL CASO

El caso de estudio se centra en la ciudad de Bucaramanga (Santander), capital del departamento de Santander. Bucaramanga es un escenario de estudio interesante tanto por su desarrollo urbanístico como por su alta sismicidad, ya que se encuentra ubicada en una de las regiones sísmicas más activas del territorio colombiano. En esta región se localizan los focos sísmicos de profundidad intermedia denominados “nido sísmico de Bucaramanga”(Coral-Gomez, 1990), localizado a 50 km de la ciudad de Bucaramanga, y catalogado como una de las zonas de mayor actividad sísmica del mundo. El proceso acelerado de urbanización que subsiste en la ciudad, la imprevisión al construir, la necesidad de vivienda económica que obliga a algunos de sus habitantes a edificar en zonas de probable riesgo sísmico y, en ciertos casos, el manejo inadecuado del problema sísmico en los proyectos de construcción, permite afirmar que ante un sismo, las probables pérdidas y número de víctimas sean considerables (Maldonado & Chio, 2005).

La zona de estudio está comprendida por las 17 comunas que conforman la ciudad de Bucaramanga, comuna Norte (1), Nororiental(2), San Francisco(3), Occidental(4), García Rovira (5), La Concordia (6), La Ciudadela (7), Sur Occidente (8), La Pedregosa (9), Provenza (10), Sur (11), Cabecera del Llano (12), Oriental (13), Morrórico (14), Centro (15), Lagos del Cacique (16) y Mutis (17).

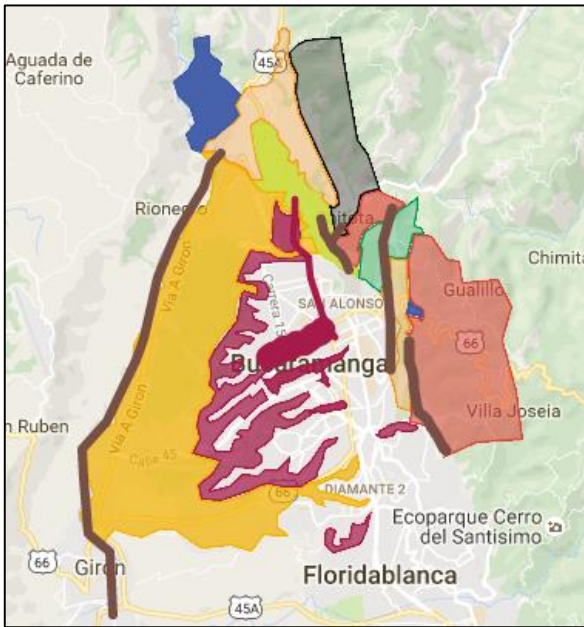
Para el desarrollo de este caso de estudio, fue necesario no solo determinar los parámetros del modelo, sino además recolectar información pertinente para la presentación de los resultados del algoritmo.

### **5.1.1 Red de emergencia**

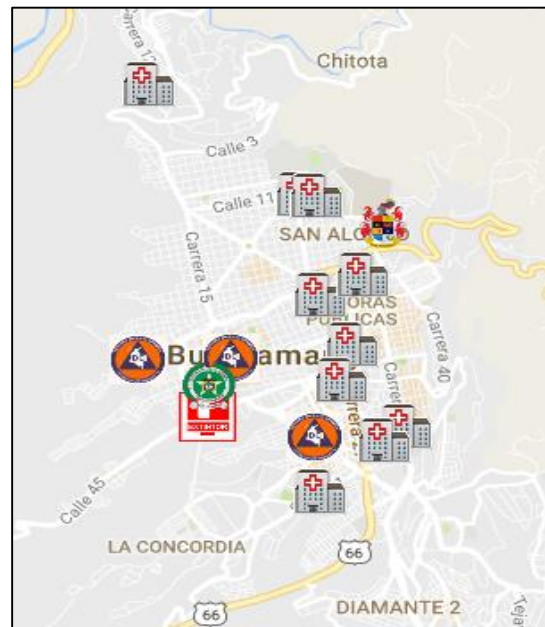
Para la construcción de la red de emergencia de Bucaramanga, se utilizó el sistema de información geográfico de la API de Google Maps, que permite la geolocalización de todos los puntos incluidos en la red, la información de la red de carreteras (sentidos de circulación vial) y la representación geográfica de la solución. La información incluida en la red, obedece al desarrollo de los proyectos de investigación de Barrera Navarro y Gomez Hernandez (2016); Barreto Robles y Niño Niño (2016); Contreras Arevalo y Martinez Galvis (2016), y un proceso extenso de búsqueda de información. Es de destacar que a diferencia de muchos trabajos donde se considera una red simétrica, en este caso al tener en cuenta los sentidos viales de acuerdo a la malla vial de la ciudad, la red del problema es asimétrica.

Se identificaron sobre el mapa de la ciudad de Bucaramanga las zonas vulnerables de acuerdo a diferentes tipos de amenazas y se demarcaron las fallas geológicas e inferidas que atraviesan la ciudad (Figura 7a). Se trazaron las vías de emergencias identificadas por el Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Bucaramanga. Sobre el mismo mapa fueron geolocalizadas las instituciones de atención de emergencias (Bomberos, defensa civil, Policía) y los principales hospitales de la ciudad (Figura 7b). Se dividió el mapa de acuerdo a las 17 comunas que conforman la ciudad (figura 7c). Se esquematizó la zonificación geomórfica de la ciudad con base en lo presentado por Maldonado y Chio (2005), quienes dividieron el mapa de Bucaramanga en 20 zonas en función de sus características estructurales prevaecientes (Figura 7d). Así mismo, sobre este mapa se localizaron todos los nodos de los potenciales albergues. Esta red, puede ser consultada aquí [“Red de Emergencia”](#)

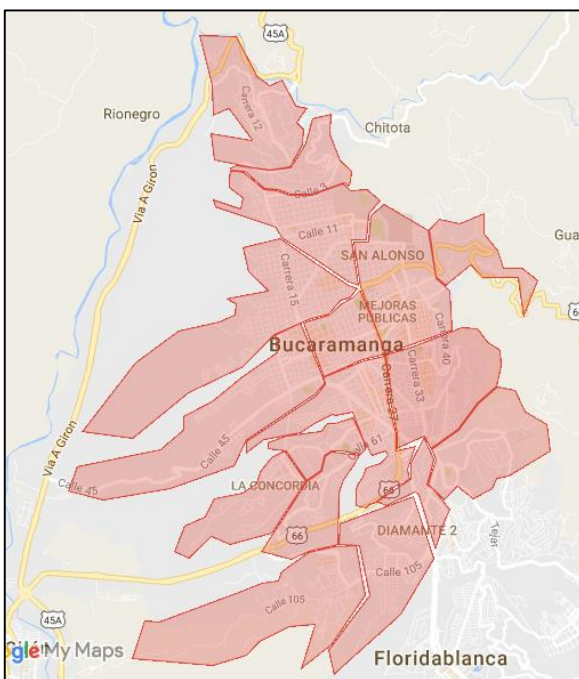
Figura 7. Principales componentes de la red de emergencias para Bucaramanga



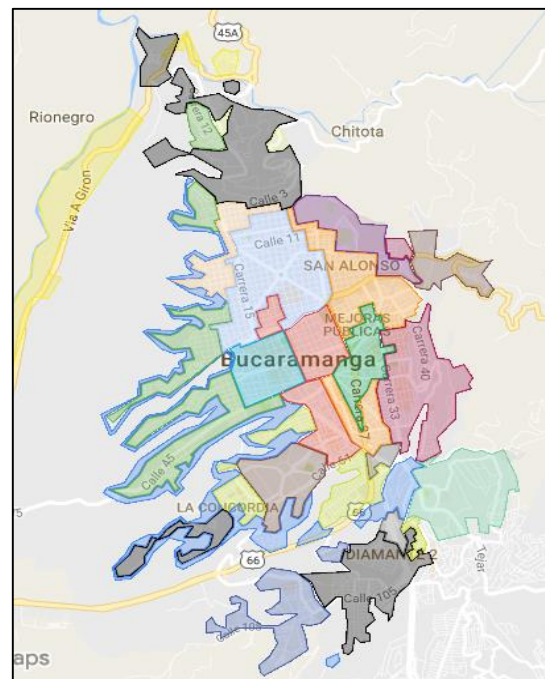
(a)



(b)



(c)



(d)

### 5.1.2 Potenciales albergues temporales

Los albergues temporales son definidos por la Federación Internacional de la Cruz Roja y la Media Luna Roja como un lugar físico creado e identificado como seguro, que cuenta con todos los medios necesarios para hospedar por un periodo corto, mediano o de largo plazo a un grupo de personas afectadas por el impacto de una amenaza, garantizando la dignidad humana, conservando la unidad familiar y la cultura de las personas afectadas así como su estabilidad física, mental y psicológica (Cruz Roja Colombiana, 2008). Existen diferentes tipos de albergues temporales dependiendo de la complejidad del desastre y de la capacidad con la que cuente el territorio donde se origine la situación de emergencia. En este estudio se consideran albergues temporales fijos, que constituyen edificaciones que cuentan con los servicios básicos necesarios para el alojamiento de las personas, que pueden ser adaptadas o construidas específicamente para este fin.

Se identificaron 125 potenciales sitios para albergar personas, 97 instituciones de educación de carácter público, 18 zonas verdes (parques y áreas verdes) y 10 zonas deportivas (coliseo, estadios y canchas), los cuales son considerados de acuerdo al Manual nacional para el manejo de albergues temporales de la Cruz Roja Colombiana, como lugares aptos para el refugio transitorio de comunidades afectas por desastres. Estos 125 puntos fueron geo-localizados sobre el mapa de Bucaramanga, como se observa en la figura 8. Para cada uno de estos nodos se elaboró un perfil, el cual contiene información sobre la comuna y el barrio en el que está localizado, el tipo de albergue (Educativo, Zona verde o Deportivo), su área total en metros cuadrados, porcentaje de zonas comunes o arborización, (dependiendo del tipo de albergue este porcentaje se extrae del área total ya que se considera destinado para los servicios básicos necesarios para el adecuado funcionamiento del albergue), y por ultimo su capacidad en número de personas que puede albergar (Figura 9).

Figura 8. Geo-localización de nodos albergue y perfilamiento

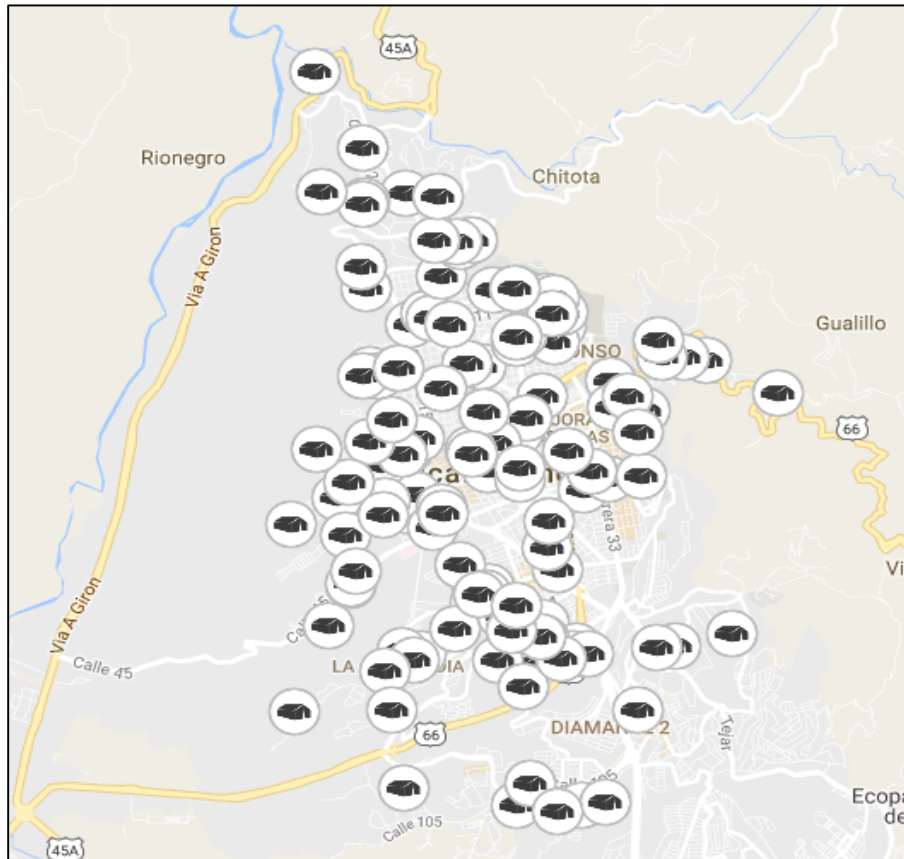


Figura 9. Geo-localización de nodos albergue y perfilamiento



Para estimar la capacidad ( $\delta$ ) de los potenciales albergues, se realizó una aproximación del número de personas que podrían ser albergadas, considerando el tipo de instalación y el requerimiento de zonas comunes. El cuadro 3 presenta las formulas usadas para la cuantificación de la capacidad de los albergues. Donde  $A$  es el área total de la instalación, en el caso de las instituciones educativas corresponde únicamente a la suma de las áreas de las aulas de clase.  $\varepsilon$  es un parámetro que indica el porcentaje que se extraer del área total y que se asume corresponde a las zonas comunes, para las zonas verdes, incluye la arborización. Finalmente,  $\beta$  es el área mínima en un albergue destinada para una persona ( $3,5m^2$ ) de acuerdo a la Cruz Roja Colombiana (2008).

Cuadro 3. Fórmulas para el cálculo de la capacidad de los albergues

Instalaciones deportivas	Zonas verdes	Instalaciones educativas
$\delta = \frac{A - (A * \varepsilon)}{\beta}$	$\delta = \frac{A - (A * \varepsilon)}{\beta}$	$\delta = \frac{A}{\beta}$

### 5.1.3 Estimación de evacuados

A partir de la zonificación geomórfica, Maldonado y Chio (2005) identifican las zonas sísmicamente más vulnerables en la ciudad; es decir, identifican las zonas que se verían más afectadas ante diferentes intensidades sísmicas (Tabla 4). Tomando en cuenta esta información se considera que la zona 12, zona 11, la zona 18 y 9A son las que se verían más afectadas ante un sismo (Figura 10). Por lo tanto, esta investigación asume que los evacuados son generados desde estas zonas. Sin embargo, se considera que no todos los evacuados requieren refugiarse en albergues temporales fijos, ya que algunos podrían encontrar refugio donde familiares o amigos, o usar otro tipo de albergue.

Figura 10. Zonas de mayor vulnerabilidad sísmica de acuerdo a Maldonado y Chio (2005)

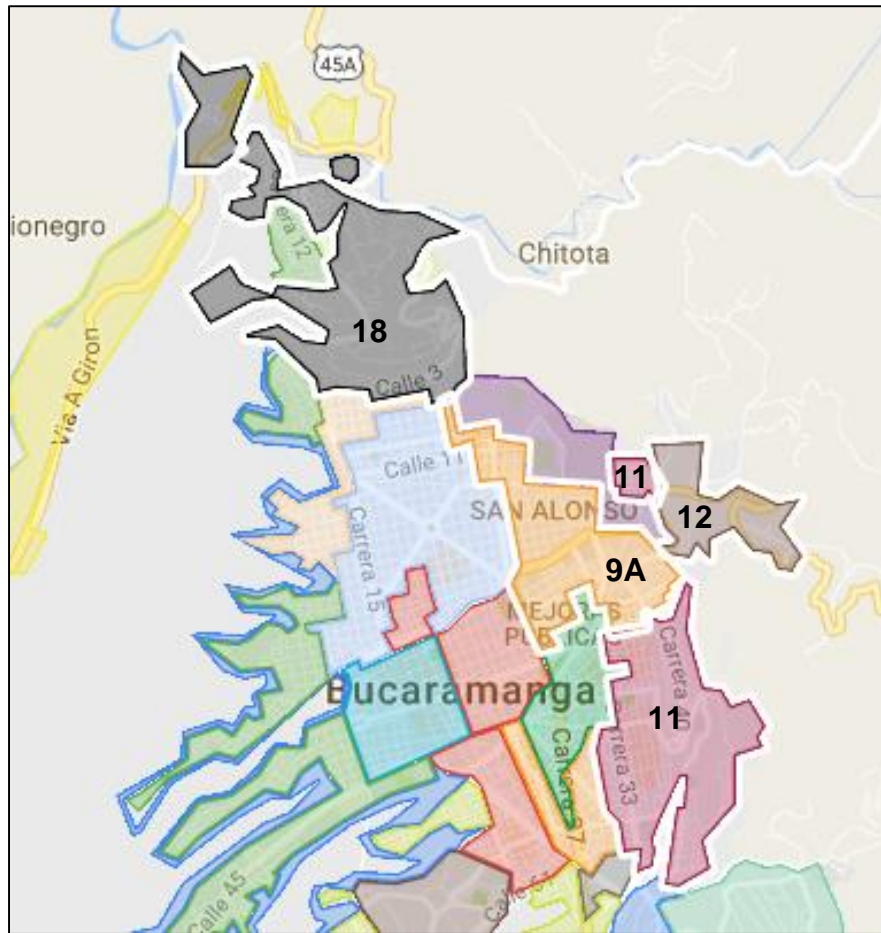


Tabla 4. Zonas más afectadas de acuerdo a los escenarios

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 y Chio (2005)

El número de personas que requieren albergue en cada área es decidido bajo dos factores: la densidad poblacional y la intensidad del sismo. La densidad poblacional es usada para establecer el número de personas que habitan cada zona.

Para simplificar el análisis, se utiliza un enfoque de agregación de demanda. Este enfoque consiste en reunir la demanda de una manzana censal en un punto medio de ésta, donde se asume están localizados todos los clientes de esa manzana. Cada uno de esos puntos es considerado un nodo cliente. El número de personas asociadas al nodo se calcula teniendo en cuenta el número de habitantes por km<sup>2</sup> (hab/km<sup>2</sup>), y el área en km<sup>2</sup> de la manzana. El número de habitantes por km<sup>2</sup> depende de la comuna en la que está localizado el nodo cliente, y se establece de acuerdo a los datos presentados en la tabla 5 para cada zona considerada. El número total de habitantes en la zona es tomado de Martínez (2012), y llevado al presente teniendo en cuenta un factor de crecimiento población promedio de 0,31% (IMEBU & UIS, 2008). Por su parte, la intensidad del sismo se relaciona a los posibles daños que puedan presentarse en las edificaciones. Con esta información, se estima el porcentaje de personas en cada zona que realmente requieren refugiarse en albergues temporales fijos.

Tabla 5. Habitantes por km<sup>2</sup> en cada zona

Comuna	ZONA 12	ZONA 11		ZONA 18		ZONA 9A
	Morrorrico	Cabecera	Oriental	Norte	Nororiental	Oriental
Total habitantes por comuna	23221,73	33820	52290	54858	35471	52290
Área total (km <sup>2</sup> )	1,17	2,67	2,66	2,36	1,08	2,66
Hab/km <sup>2</sup>	19847,63	12666,67	19657,9	23244,91	32843,51	19657,9

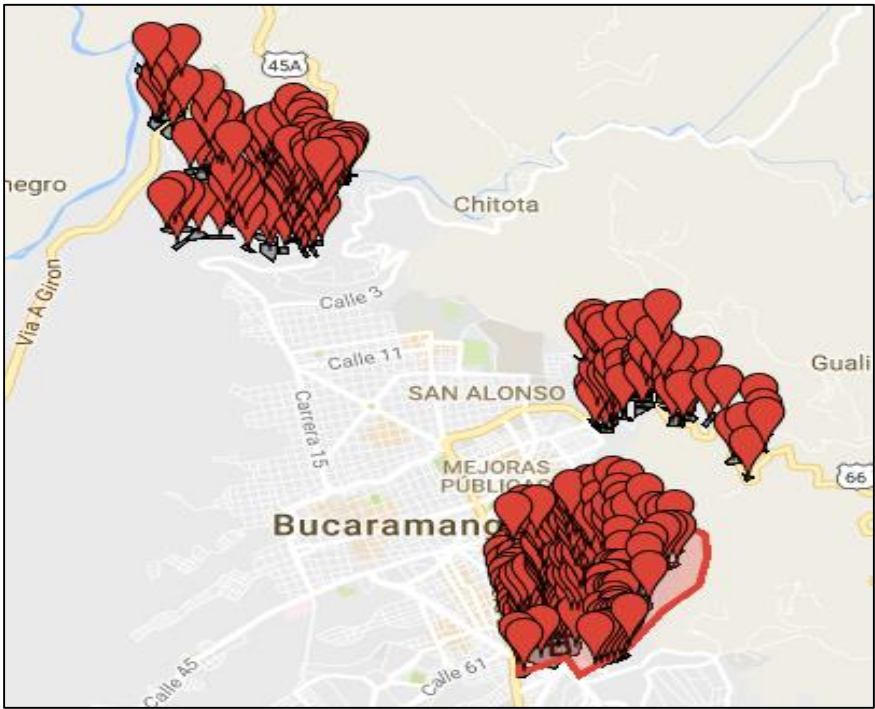
La Tabla 6 muestra el porcentaje estimado de población que requiere albergue en cada zona de acuerdo a la intensidad t de un sismo. Los valores presentados fueron tomados con base en el nivel de afectación por comuna presentado por Maldonado y Chio (2005); los autores establecen que las zonas identificadas como más

vulnerables alcanzan un estado de daño fuerte en sismos de intensidad 6, 7 y 8, y podrían llegar al colapso total ante un sismo con intensidad superior a 9. Los nodos clientes de las zonas de influencia son geo localizados en el mapa de la ciudad utilizando Google Maps, 392 nodos clientes fueron identificados. (Figura 11). Se asume que la demanda total siempre será satisfecha, y menor o igual a la capacidad de los albergues habilitados

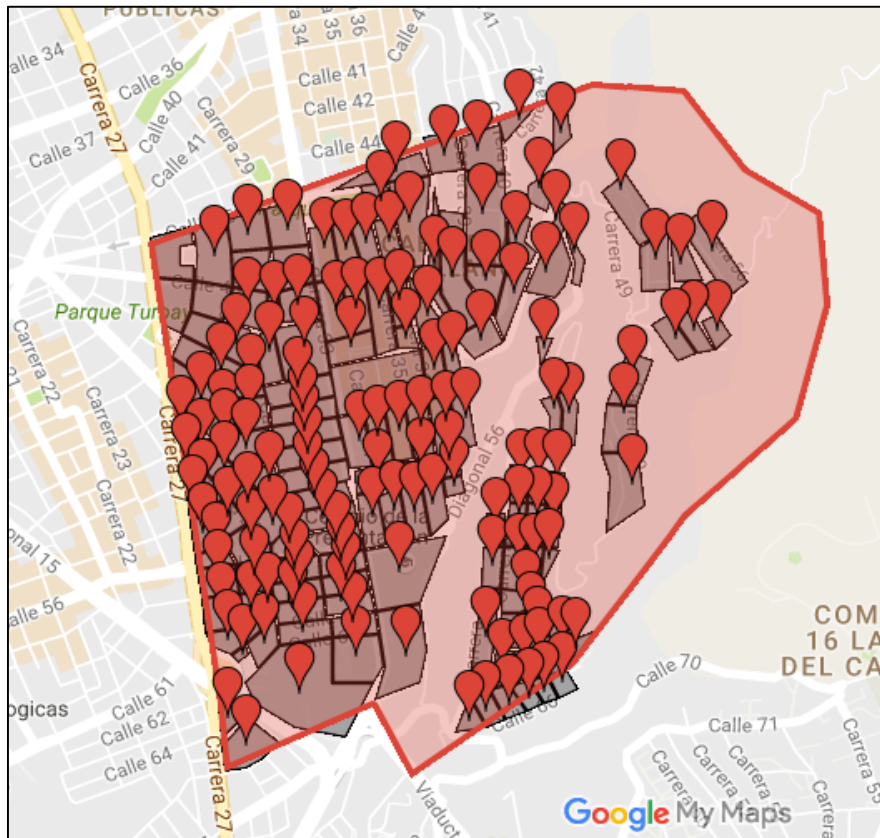
Tabla 6. Porcentaje de evacuados en la zona k para un sismo de intensidad t

Intensidad del sismo	Zona k			
	Zona 12	Zona 18	Zona 9A	Zona 11
t=6	30-60%	10-30%	0-10%	0-10%
t=7	30-60%	10-30%	10-30%	10-30%
t=8	30-60%	30-60%	10-30%	10-30%

Figura 11. Ubicación de los nodos clientes(a) y agregación por manzanas (b)



(a)

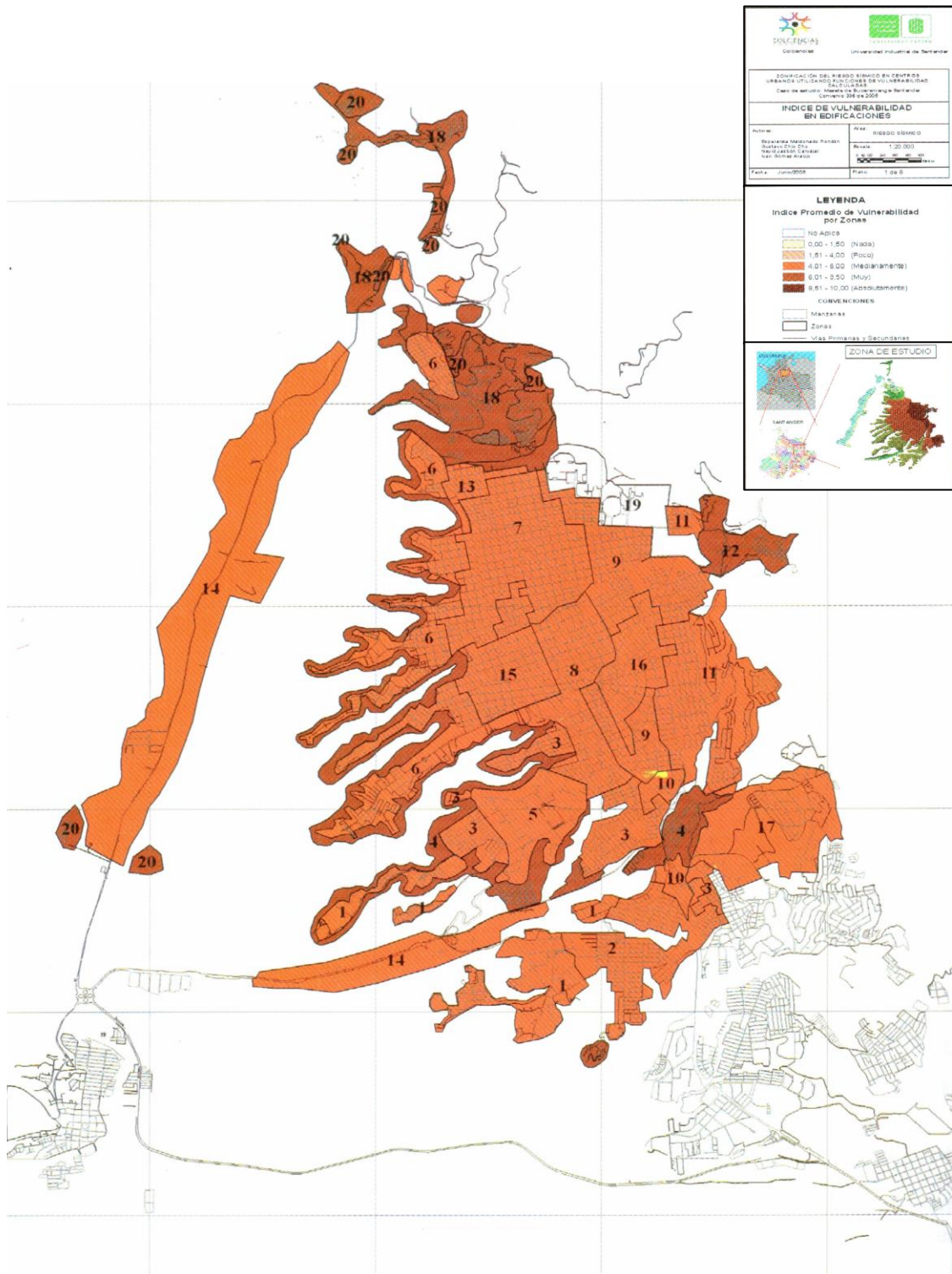


(b)

## 5.2 PARÁMETRO DE CONFIABILIDAD

El parámetro de confiabilidad hace referencia a la vulnerabilidad sísmica asociada al albergue. La vulnerabilidad sísmica de una estructura se define como la predisposición intrínseca a sufrir daños ante la ocurrencia de un movimiento sísmico y está asociada directamente con sus características estructurales de diseño (Barbat, 1998). En vista de que la ciudad no posee un estudio de vulnerabilidad por manzanas, ni un estudio de microzonificación sísmica que permita un acercamiento a valores reales de vulnerabilidad, esta investigación utiliza la información suministrada por Maldonado y Chio (2008) sobre el índice de vulnerabilidad promedio de las edificaciones de Bucaramanga de acuerdo a la zonificación geomórfica,

Figura 12. Mapa de vulnerabilidad promedio de Bucaramanga



Fuente: Maldonado y Chio (2008)

En la figura 12 se muestra el mapa de vulnerabilidad de la ciudad de Bucaramanga, donde se presenta el índice promedio de vulnerabilidad para cada zona. Con el propósito de generar un valor del parámetro de confiabilidad, para cada albergue se genera un número aleatorio entre los límites del índice de vulnerabilidad en la zona donde se encuentra localizado. Por ejemplo, en la figura 12, la zona 18 tiene un índice entre 6.01 y 8.5, por lo que los albergues ubicados en esa zona, tendrán un valor de vulnerabilidad entre estos dos valores.

### 5.3 GENERACIÓN DE ESCENARIOS

En este caso de estudio, se desarrollan dos escenarios de prueba, en los que se considera la eventualidad de un sismo con nivel de intensidad 6 y 7 de acuerdo a la escala de Mercalli.

Para la generación de los escenarios se toma en cuenta la información presentada en los ítems anteriores de este capítulo.

#### 5.3.1 Red de nodos

En ambos escenarios la red consiste de 505 nodos, distribuidos así:

**Albergues potenciales:** Se consideran 113 albergues potenciales, se excluyen las instalaciones ubicadas en las zonas más vulnerables bajo estudio, teniendo en cuenta el porcentaje de afectación a los que se verían expuestos.

**Nodos clientes:** Un total de 392 nodos clientes están ubicados en las zonas 12, 18, 11 y 9A, identificadas previamente en la zonificación geomórfica. La distribución del número de nodos por zonas se presenta en la tabla 7.

**Conjunto de aristas:** Las aristas de la red son las vías que comunican todos los nodos, se tiene en cuenta la información disponible en Google Maps sobre los sentidos viales. Se asume que las vías se encontrarán en buen estado después de la eventualidad de un sismo.

### 5.3.2 Demanda

La demanda en los nodos clientes varía de acuerdo a la zona, en relación al porcentaje de personas evacuadas para un sismo de intensidad  $t$  expuesto en la tabla 6. Con base en estos valores se establece el porcentaje que se extrae de la demanda de cada nodo cliente, este nuevo valor se considera la demanda actual en cada escenario; es decir, el número de personas que requieren refugiarse en albergues temporales fijos. Los porcentajes de evacuados tomados para cada zona en los niveles de intensidad 6 y 7 se muestran en la tabla 7. En el caso de la zona 18, se dividió en 18-1 y 18-2, al estar formado por dos comunas, y se tomaron porcentajes diferentes en cada zona.

Tabla 7. Número de nodos y porcentaje de evacuados por zona

Zona	Número de nodos	% de evacuados intensidad $t$	
		$t=6$	$t=7$
12	67	40	50
18-1	82	20	30
18-2	55	10	30
9A	53	10	20
11	135	10	25
Total	392		

### 5.3.3 Confiabilidad

Los índices de vulnerabilidad de la figura 12 fueron usados para estimar el parámetro de confiabilidad. Con base en este mapa, el valor del parámetro de confiabilidad oscilará entre 4.01 y 8.5 de acuerdo a la zona. La tabla 8 expone el índice que le corresponde a cada área de la zonificación geomórfica. Para asignar un valor del parámetro de confiabilidad a cada albergue, se genera un número aleatorio entre los valores del índice que le corresponde a la zona donde el albergue está localizado.

Tabla 8. Índice Promedio de Vulnerabilidad para las zonas geomórfica

Zonas	Índice promedio de Vulnerabilidad
1,2,3,5,6,7,8,9,10,11,13,14,15,16,17,18	4.01-6.0 (Medianamente)
4,12,18,20	6.1-8.5 (Muy)
19	No aplica

Los escenarios fueron esbozados en Google maps, consisten en la localización de todos los nodos de la red y la información de capacidad y confiabilidad en los albergues, junto a la demanda de los nodos clientes.

Estos pueden ser consultados en los siguientes enlaces.

[Escenario t=6](#)

[Escenario t=7](#)

## 6 RESULTADOS Y ANALISIS

Para el caso descrito en la sección 5, se desarrollan dos instancias o escenarios de prueba, en los que se considera la eventualidad de un sismo con nivel de intensidad de 6 y 7 de acuerdo a la escala de Mercalli. Sobre el caso de estudio se aplica el algoritmo memético propuesto para el LPR capacitado, descrito en la sección 3. Para facilitar la implementación del algoritmo y la presentación de los resultados del caso, se desarrolla una herramienta web basada en el sistema de información geográfico de Google Maps.

La herramienta permite la geolocalización de los albergues y nodos clientes, ingresar características como la demanda del nodo cliente, capacidad y confiabilidad de cada albergue y flota de transporte (en el caso de considerarse con restricción de capacidad sobre los vehículos).

### 6.1 RESULTADOS ESCENARIOS DE PRUEBA

Haciendo uso de la plataforma, los 504 nodos que componen la red son geolocalizados y su información ingresada.

Los dos escenarios propuestos fueron solucionados mediante el algoritmo memético desarrollado. Los parámetros del algoritmo fueron revisados mediante corridas de prueba con el propósito de determinar el tiempo computacional y la calidad de las soluciones, teniendo en cuenta que en el campo de aplicación de esta investigación es fundamental una respuesta rápida y acertada. Para realizar estas pruebas se considera una flota homogénea, compuesta por 113 vehículos, uno por cada albergue, y se fijó la capacidad del vehículo en 137 para las corridas en el escenario 1 y de 339 para el escenario 2, estos valores corresponden a la demanda máxima entre todos los nodos clientes en cada escenario.

□ **ESCENARIO 1: NIVEL DE INTENSIDAD SIMICA t=6**

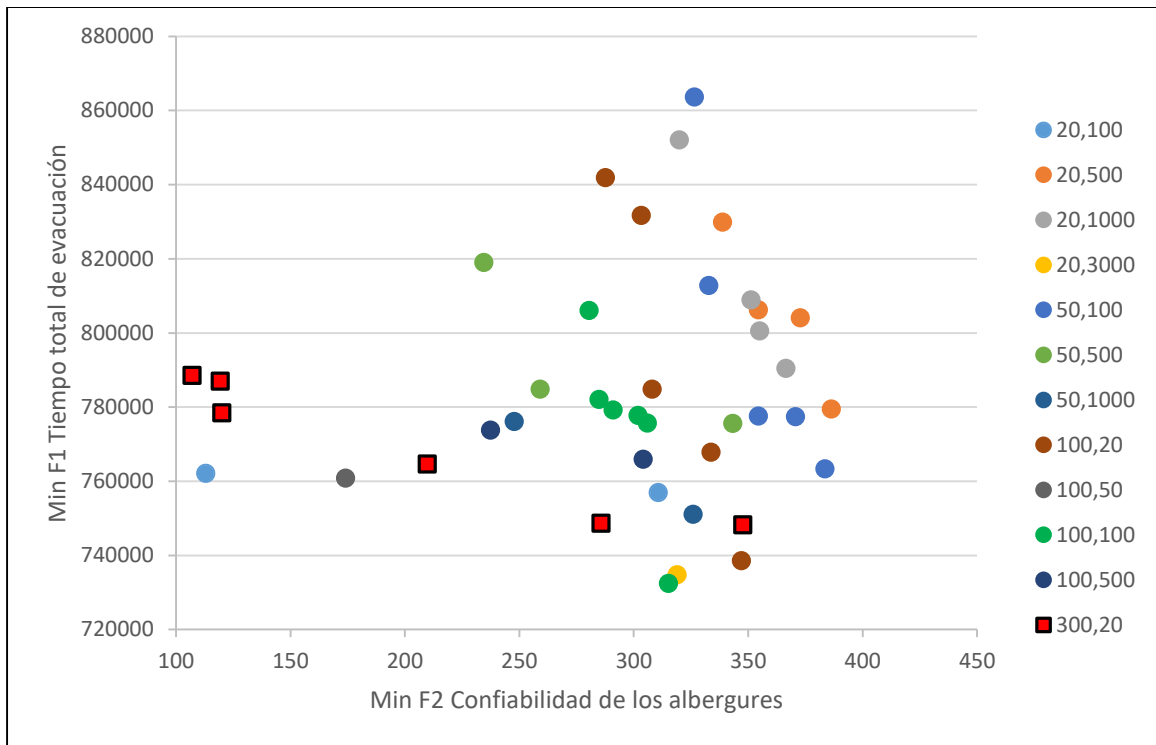
Las pruebas realizadas para el escenario 1, consistieron en la variación del parámetro tamaño de la población y número de generaciones. La tabla 9 presenta el valor promedio obtenido en las funciones objetivo en cada combinación de los parámetros junto al tiempo computacional. El conjunto de soluciones óptimas de Pareto de acuerdo a la combinación de parámetros es presentado en las figura 13.

Tabla 9. Corridas de prueba escenario intensidad nivel 6

Escenario 1 (t=6)		Capacidad Vehículo=137		
Tamaño de la población	Número de generaciones	Promedio función 1 (Tiempo)	Promedio función2 (confiabilidad)	Tiempo de CPU
20	100	806407.9	338.54595	3m29.43s
20	500	828651.1	385.03215	17m16.23s
20	1000	842113.65	367.0005	36m3.57s
20	5000	816185.7	368.26005	1h45m58s
50	100	836541	380.45508	9m2.92s
50	500	824875.96	373.40176	41m22.23s
50	1000	834953.32	356.45734	1h27m51s
100	20	839389.99	360.721	3m45.63s
100	50	834226.24	375.489	8m59.74s
100	100	833483.84	372.272	17m16.08s
100	500	828537.88	367.21847	1h31m6.9 s
300	20	824128.99	359.29567	10m54.48s

Se puede observar que el algoritmo memético obtuvo un mayor número de soluciones de Pareto y con más diversidad, bajo la combinación de parámetros tamaño de población 300 y 20 como número de generaciones. Además, las soluciones óptimas de Pareto generadas con un tamaño de población de 20 dominan a casi todas las soluciones obtenidas bajo las otras combinaciones. El tomador de decisiones puede elegir una solución específica del conjunto de soluciones de Pareto de acuerdo a sus preferencias, sin dejar de lado el factor del tiempo computacional, ya que una respuesta rápida puede restarle calidad a las soluciones.

Figura 13. Soluciones del frente de Pareto en cada combinación de parámetros en el escenario 1.



Considerando que una amplia gama de soluciones de Pareto es de mayor relevancia para el caso de estudio ya que ofrecería más opciones al tomar de decisiones, se ejecuta la herramienta para el escenario 1 con un tamaño de población de 300 y un número de generaciones de 20. Los resultados obtenidos con esta configuración son resumidos a continuación

El fitness de las soluciones que hacen parte del frente de Pareto indicadas de izquierda a derecha en la figura 14, se exponen en la tabla 11.

Para describir los resultados, se eligen las soluciones de los extremos de la frontera de Pareto en la figura 14. La figura 15 ilustra la solución óptima de Pareto con base en la función objetivo 1 (minimización del tiempo total de evacuación), y la figura 16 expone la solución óptima de Pareto según el objetivo 2 (minimización de la confiabilidad total de los albergues habilitados), representando las soluciones 6 y 1 de la tabla 10, respectivamente.

Figura 14. Frente de Pareto para el escenario 1 bajo los parámetros 300 individuos -20 generaciones

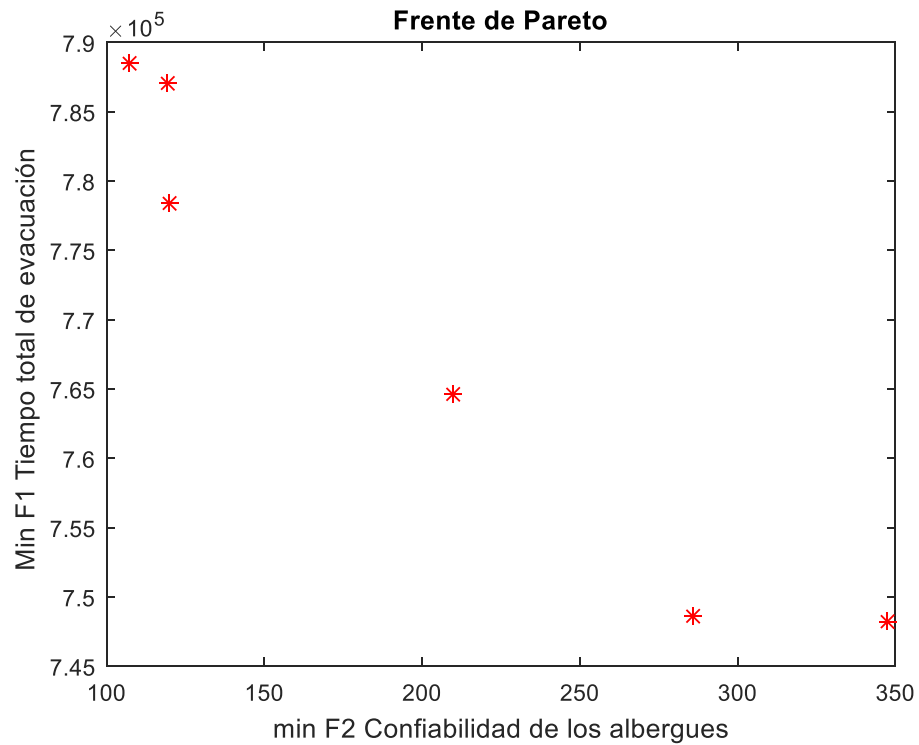
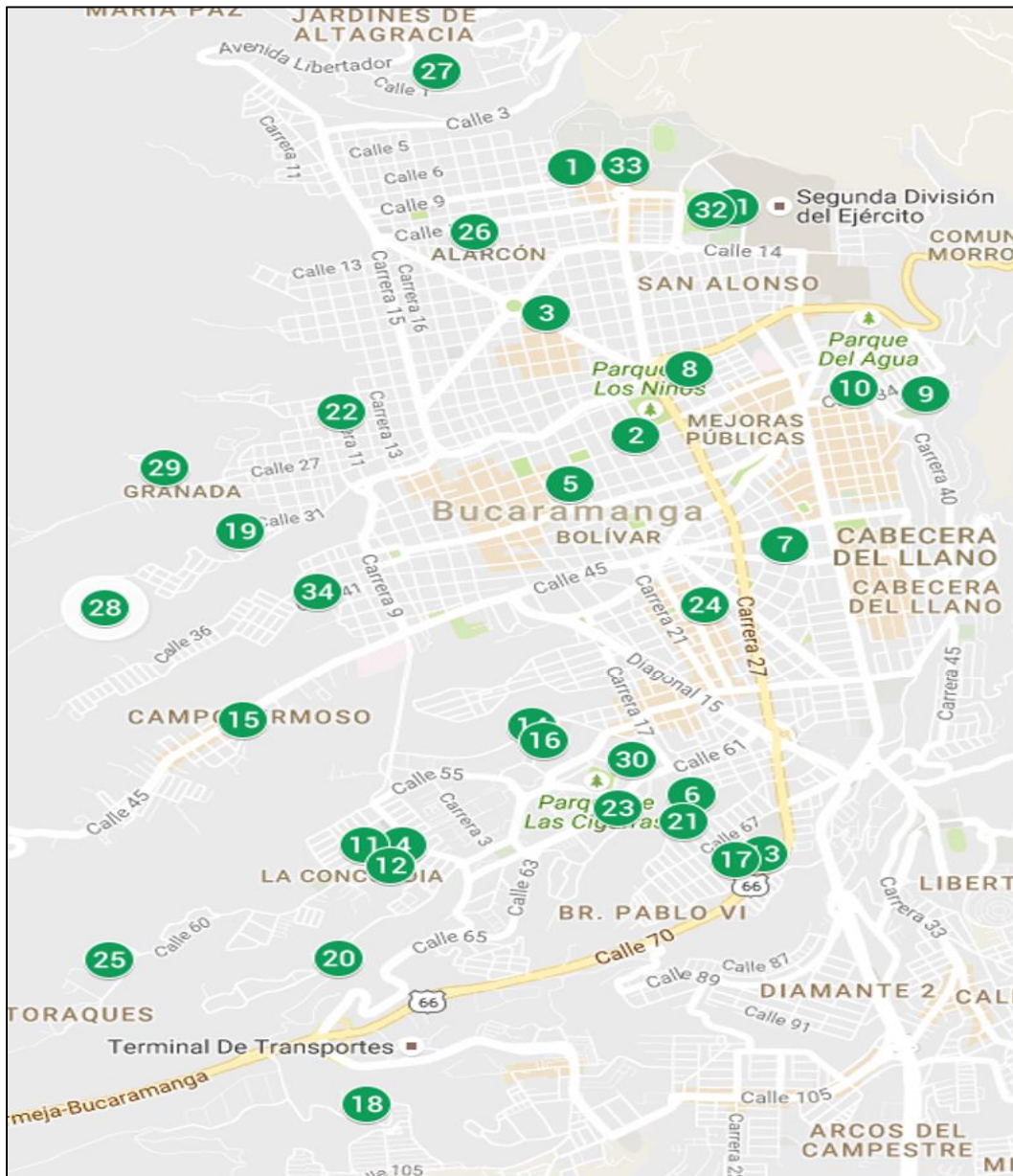


Tabla 10 Soluciones de Pareto (300 individuos, 20 generaciones) para el escenario 1 (t=6)

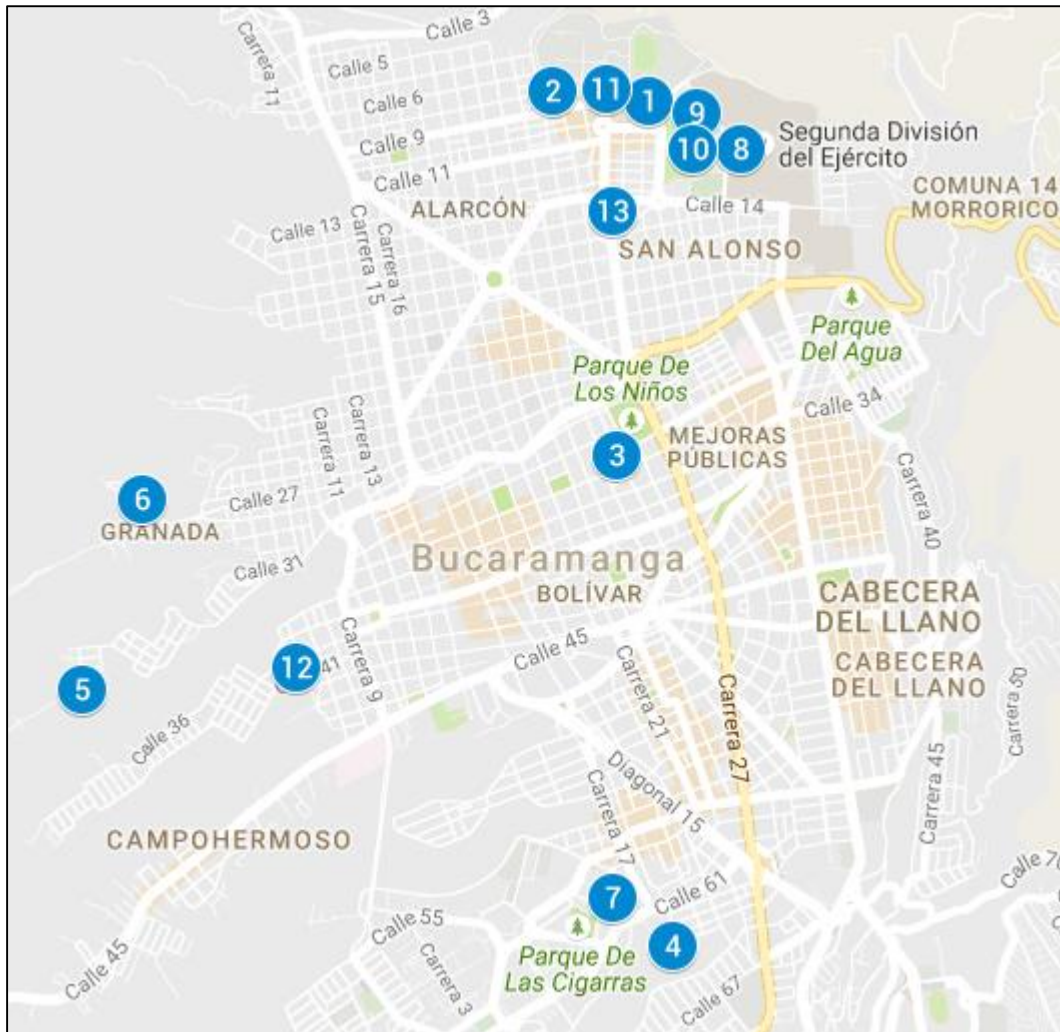
Solución N°	Número de albergues abiertos	Función objetivo 1 (Tiempo en s)	Función objetivo 2 (Confiabilidad)
1	13	788506	107.058
2	19	787014	119.4
3	21	778431	120.04
4	21	764595	209.875
5	26	748638	285.674
6	34	748239	347.68

Figura 15. Solución minimizando el tiempo total de evacuación (Escenario 1)



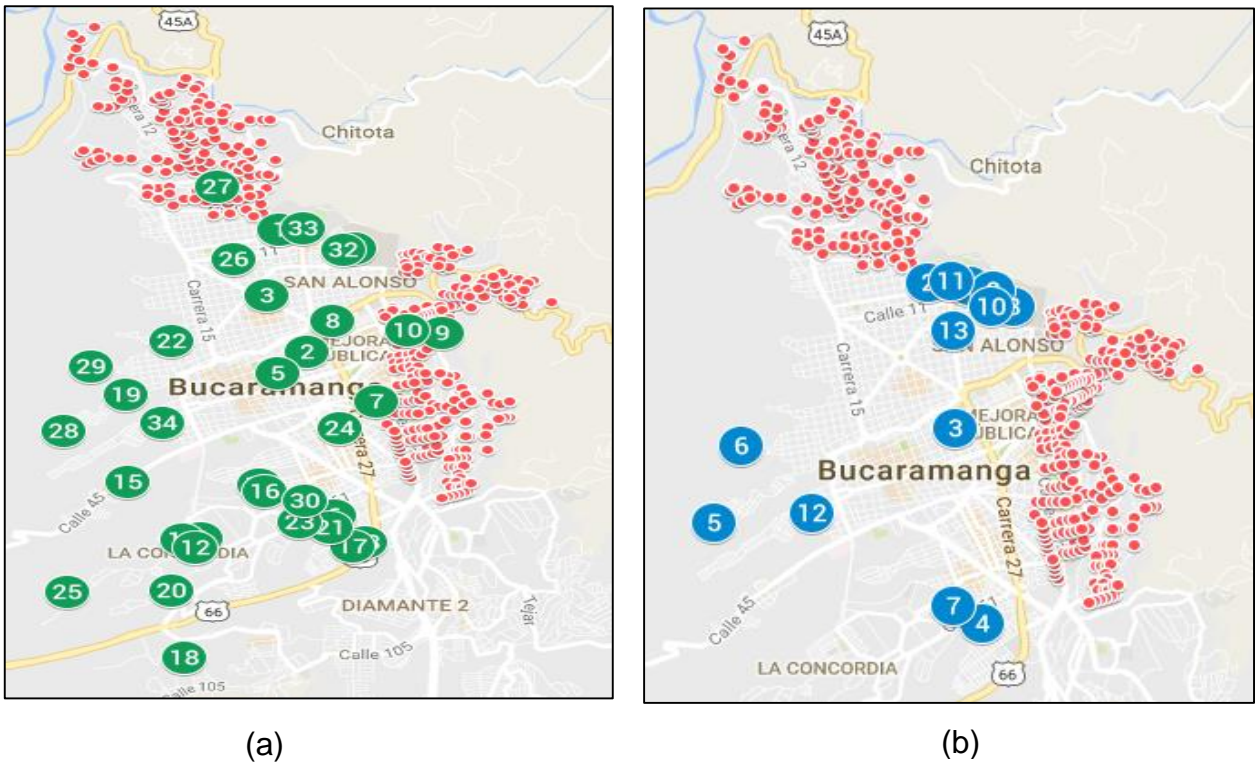
En la figura 15 (solución 6) se habilitan 34 albergues, esta solución corresponde al tiempo total de evacuación más corto entre las soluciones obtenidas, con tiempos de recorrido en promedio de 30 minutos a pie. En comparación con la figura 16, un número menor de albergues son seleccionados en la figura 16 (solución 1) obteniendo un valor menor en la función de confiabilidad, mientras que el tiempo de evacuación promedio a pie es de cerca de 40 minutos.

Figura 16. Solución minimizando la confiabilidad total de los albergues abiertos (Escenario 1)



Las figuras 17a y 17b muestran la distribución de los clientes (puntos rojos) respecto a los albergues habilitados en cada solución. Se observa que en la solución que habilita más albergues (Figura 17a), estos están mejor distribuidos en la ciudad respecto a los clientes; mientras que en la otra solución (Figura 17 b) los albergues seleccionados se concentran en dos zonas lo que explicaría los largos recorridos que se presentan en este resultado.

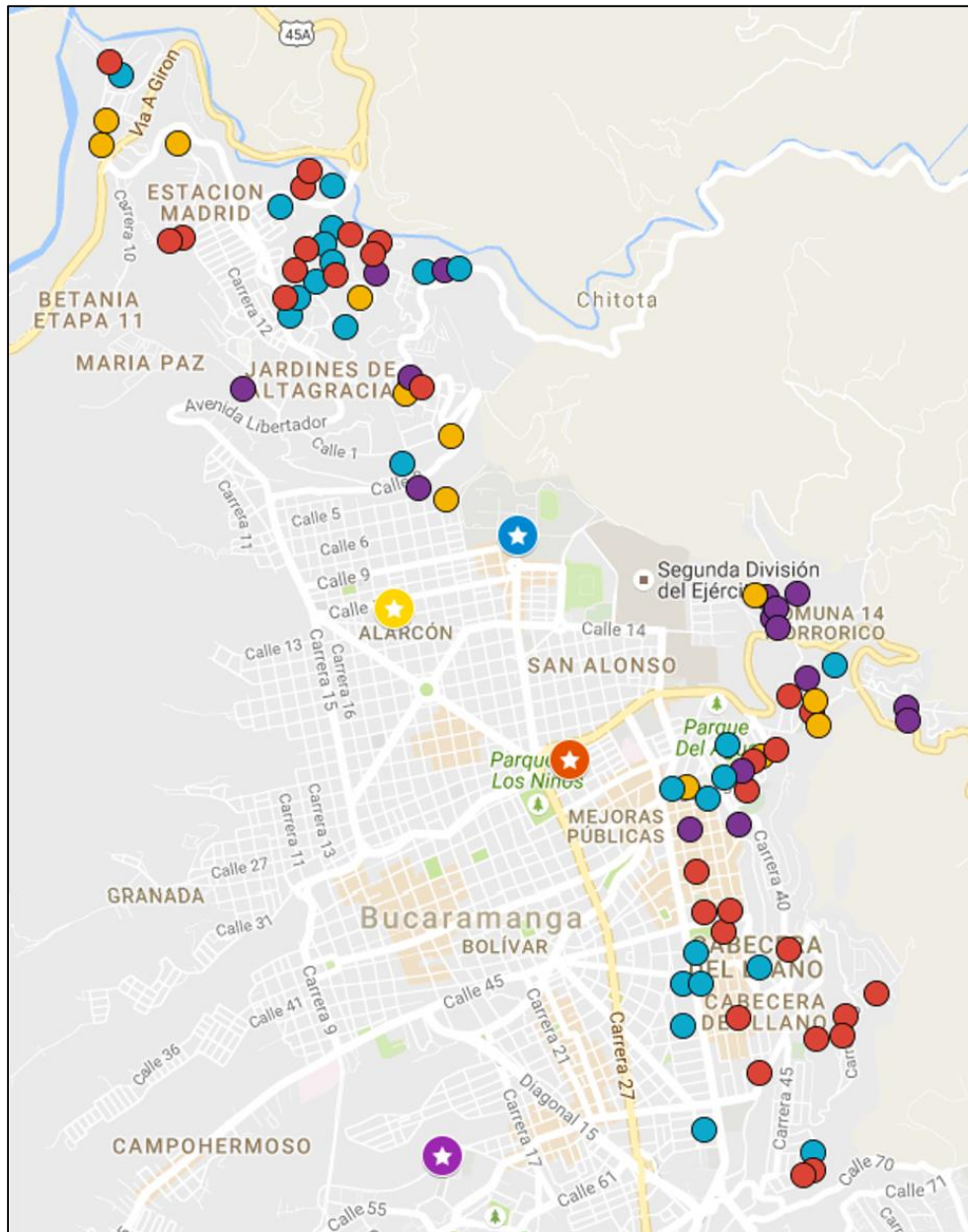
Figura 17. Albergos habilitados y puntos de clientes en (a) la solución minimizando tiempo, (b) la solución minimizando confiabilidad



En ambas soluciones, se habilitan albergues que se encuentran en zonas de vulnerabilidad sísmica media; así mismo, la capacidad total de los albergues supera la demanda, y en muchos casos es subutilizada.

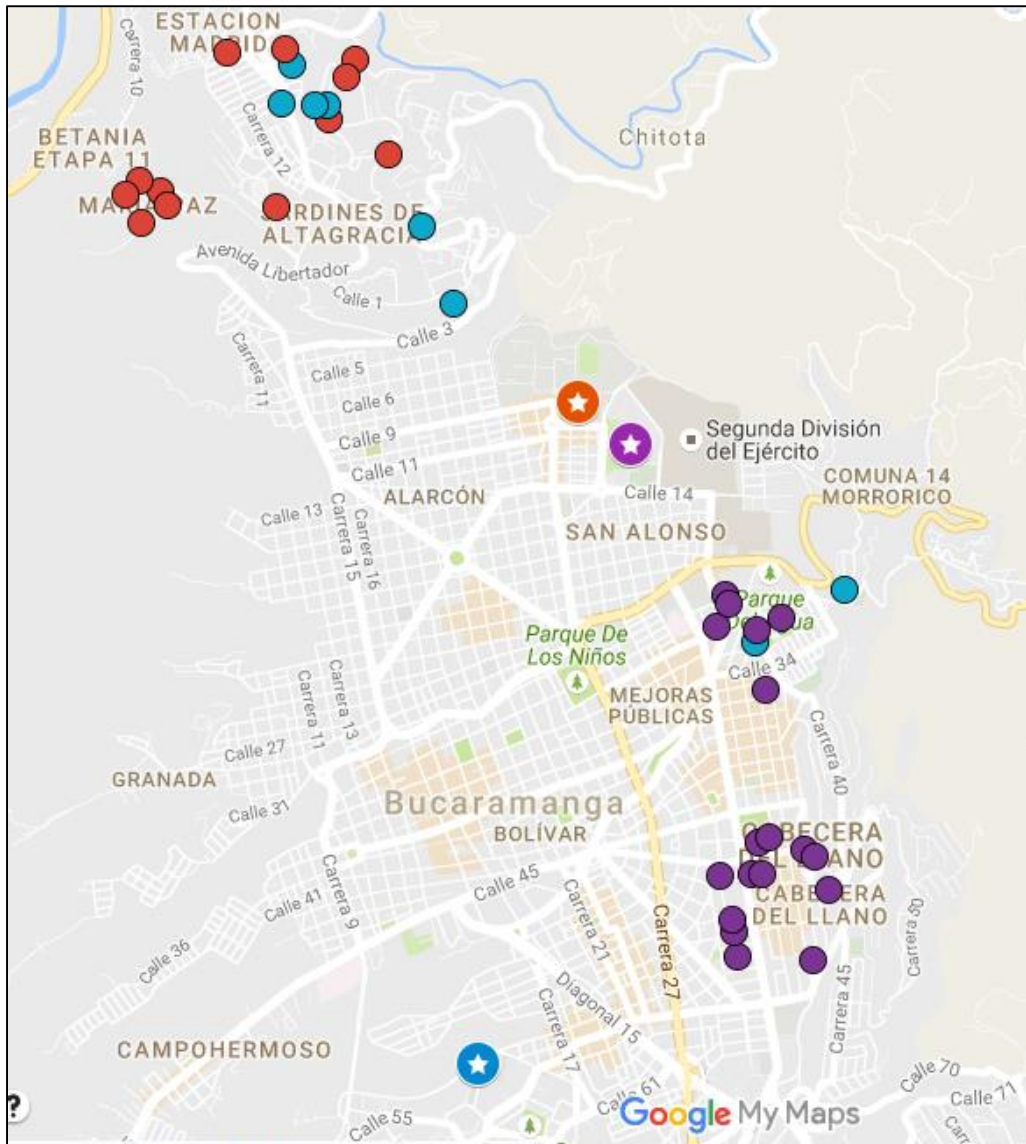
Las figuras 18 y 19 muestran la distribución de clientes en los albergues con mayor número de nodos asignados en las soluciones descritas anteriormente. En el caso de la figura 18 basada en la minimización del tiempo total de evacuación (Figura 15), se observa que los grupos de nodos clientes se concentran a una distancia cercana al albergue al que fueron asignados. De manera opuesta, al abrir menos albergues, ocasiona que los clientes deban realizar largos recorridos para llegar a su destino, ya que algunos nodos se encuentran a distancias lejanas (Figura 19).

Figura 18 Asignación de clientes en la solución minimizando el tiempo total de evacuación (Escenario 1)



Cada solución del frente ofrece alternativas válidas de acuerdo a los intereses de usuario, si la intención es realizar una evacuación en el menor tiempo posible, el tomador de decisiones se concentrará en los resultados en el que este objetivo es menor, sacrificando la seguridad de los clientes al asignarlos a albergues con mayor vulnerabilidad, y caso contrario si se busca minimizar el riesgo de la evacuación.

Figura 19 Asignación de clientes en la solución minimizando la confiabilidad (Escenario 1)



- **INDICACIONES**

El conocimiento de los ciudadanos sobre las vías de evacuación es un aspecto fundamental al momento de la respuesta ante un desastre. Por ello dentro de la plataforma se agregó la posibilidad de conocer las indicaciones para llegar desde un nodo cliente a su albergue asignado. La plataforma utiliza la API de Google para

generar los tiempos de recorrido hacia el albergue, permite conocer el trayecto a seguir, la distancia en kilómetros y el tiempo que toma recorrerlo, usando el modo de transporte a pie. En ambas soluciones se presentan rutas cortas y largas; sin embargo, en la solución basada en la minimización del tiempo, los trayectos en su mayoría no superan los 30 minutos caminando, aunque se pueden encontrar rutas de más de 40 minutos de recorrido. Por ejemplo, en la figura 20 para llegar al albergue ubicado en el colegio Santander sede A (nodo 1 en la figura 15, puntero A en la figura 20) desde un nodo cliente localizado en la zona 12 (comuna Morrónico, puntero B en la figura 20), la plataforma le indica al usuario que deberá recorrer 2 km y que le tomará 31 minutos aproximadamente siguiendo las siguientes indicaciones.

1. Dirígete hacia el sur (59 metros)
2. Gira ligeramente a la izquierda hacia calle 14 (0.2 km)
3. Gira a la izquierda hacia Cl 14 (57 metros)
4. Gira a la derecha hacia Cra 32b (0.3 km)
5. Gira a la izquierda hacia Cl 19 (0.2 km)
6. Gira a la derecha hacia Cra 33a (48 metros)
7. Gira a la izquierda hacia carretera 66 (0.6 km)
8. Gira ligeramente a la derecha hacia Cra 47 (0.1 km)
9. Gira a la izquierda hacia Cl 32 (0.2 km)
10. Cl 32 continúa hacia la izquierda hasta Cra 51 (0.2 km)
11. Gira a la derecha, el destino está a la izquierda

También se presentan casos en los que el cliente deberá caminar más de 40 minutos para llegar al albergue. En la figura 21 se muestra un ejemplo de este tipo de ruta, además se presentan las indicaciones del recorrido, en la que el cliente tendrá que caminar 3.7 km en 49 minutos para llegar al albergue.

Figura 20. Caso ruta corta: ruta e indicaciones para dirigirse a un albergue desde un nodo cliente (Minimizando tiempo)

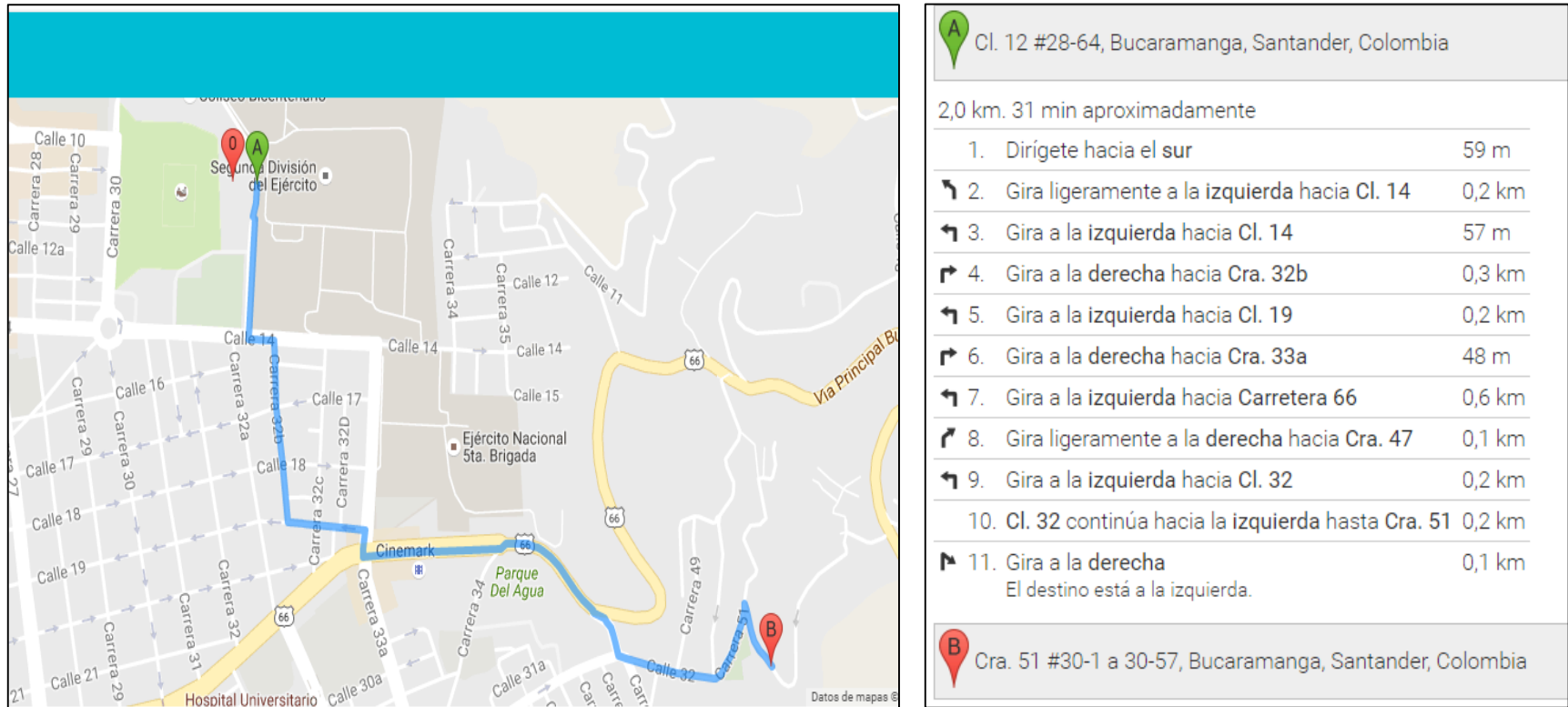
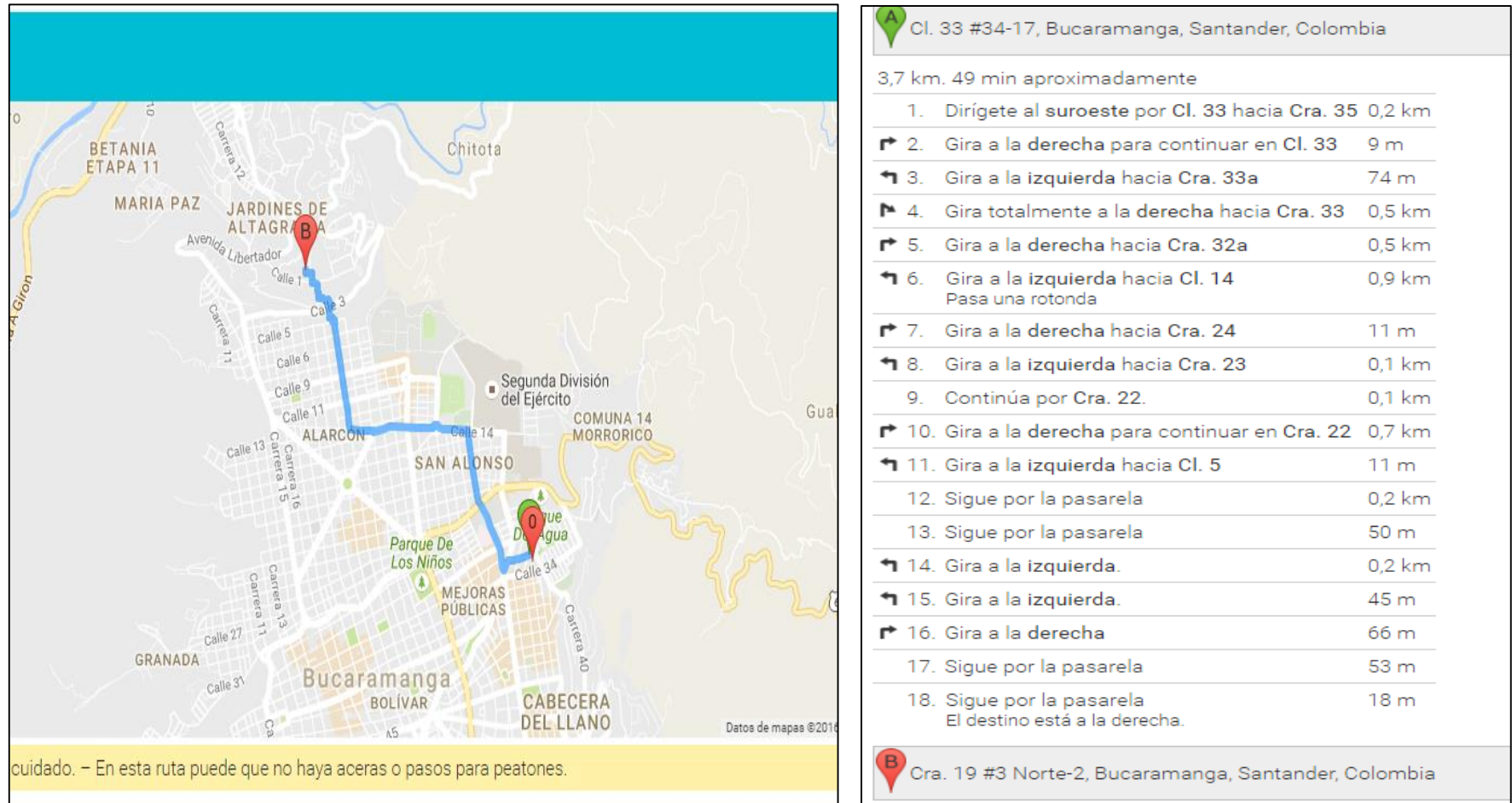


Figura 21. Caso ruta larga: ruta e indicaciones para dirigirse a un albergue desde un nodo cliente (minimizando tiempo)



□ **ESCENARIO 2: NIVEL DE INTENSIDAD SISMICA t=7**

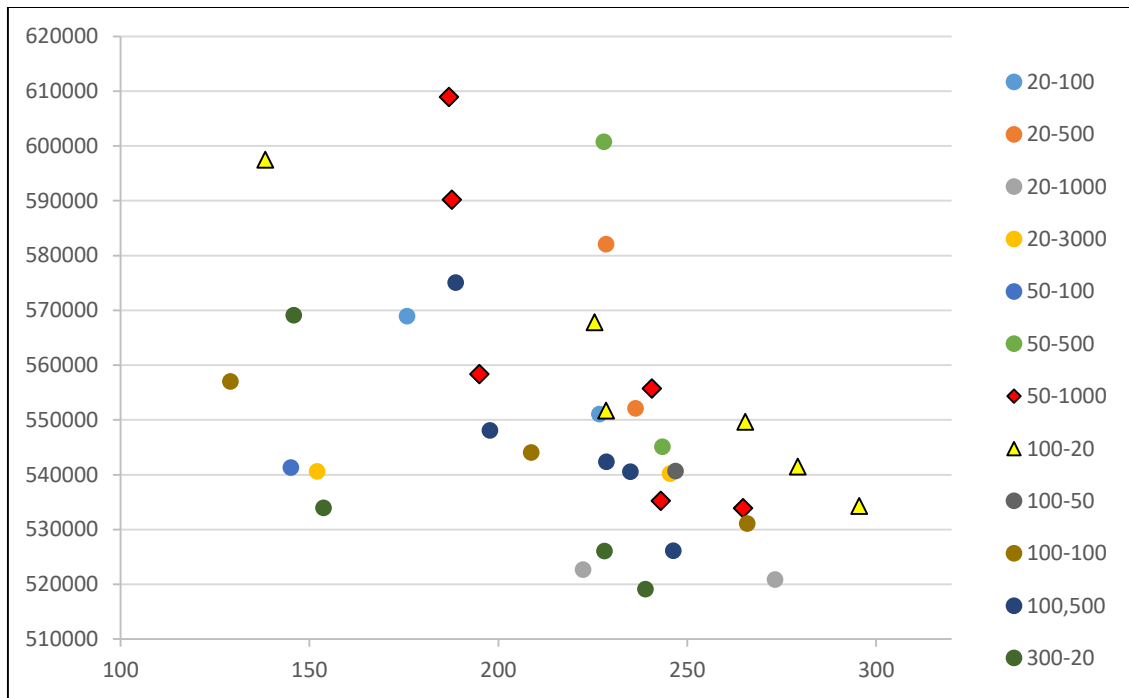
Las pruebas realizadas para el escenario 2, consistieron en la variación del parámetro tamaño de la población y número de generaciones. La tabla 11 presenta el valor promedio obtenido en las funciones objetivo en cada combinación de los parámetros junto al tiempo computacional. El conjunto de soluciones óptimas de Pareto de acuerdo a la combinación de parámetros es presentado en las figura 22.

Tabla 11. Corridas de prueba escenario intensidad nivel 7

Escenario 2 (t=7)		Capacidad Vehículo=339		
Tamaño de la población	Número de generaciones	Promedio función 1 (Tiempo)	Promedio función2 (confiabilidad)	Tiempo de CPU
20	100	583739.8	265.106	2m40.44s
20	500	593229.2	271.2139	11m48.76s
20	1000	570814.3	276.88695	23m54.35s
20	5000	589209.05	264.40505	1h11m28s
50	100	586837.7	277.74964	6m52.023s
50	500	593573.46	281.0061	30m2.052s
50	1000	578663.28	267.54174	48m40.15s
100	20	591617.61	275.51799	1m56.61s
100	50	580248.69	266.5894	4m54.29s
100	100	582220.11	271.43734	10m29.76s
100	500	590139.19	269.06636	48m33.10s
300	20	584118.4133	259.8624433	5m51.44s

Al igual que en el escenario 1, se elige la combinación de parámetros que genera un mayor número de soluciones y presenta mayor diversidad; con base en la figura 22 se opta por un tamaño de población de 100 y un número de generaciones de 20. Una combinación alternativa sería un tamaño de población de 50 y 1000 generaciones; sin embargo, requiere más tiempo computacional que la combinación elegida, por razones prácticas de este estudio, el tiempo es un recurso fundamenta.

Figura 22 Soluciones del frente de Pareto en cada combinación de parámetros en el escenario 2.



Considerando que una amplia gama de soluciones de Pareto es de mayor relevancia para el caso de estudio, ya que ofrecería más opciones al tomar de decisiones, se ejecuta la herramienta para el escenario 2 con un tamaño de población de 100 y un número de generaciones de 20. Los resultados obtenidos con esta configuración son resumidos a continuación

El fitness de las soluciones que hacen parte del frente de Pareto indicadas de izquierda a derecha en la figura 23, se exponen en la tabla 12.

De manera similar que en el escenario 1, para describir los resultados, se eligen las soluciones de los extremos de la frontera de Pareto en la figura 23. Se observa que el número de albergues habilitados aumenta conforme disminuye el tiempo de evaluación y aumenta la confiabilidad.

Figura 23. Frente de Pareto para el escenario 2 bajo los parámetros 100 individuos -20 generaciones

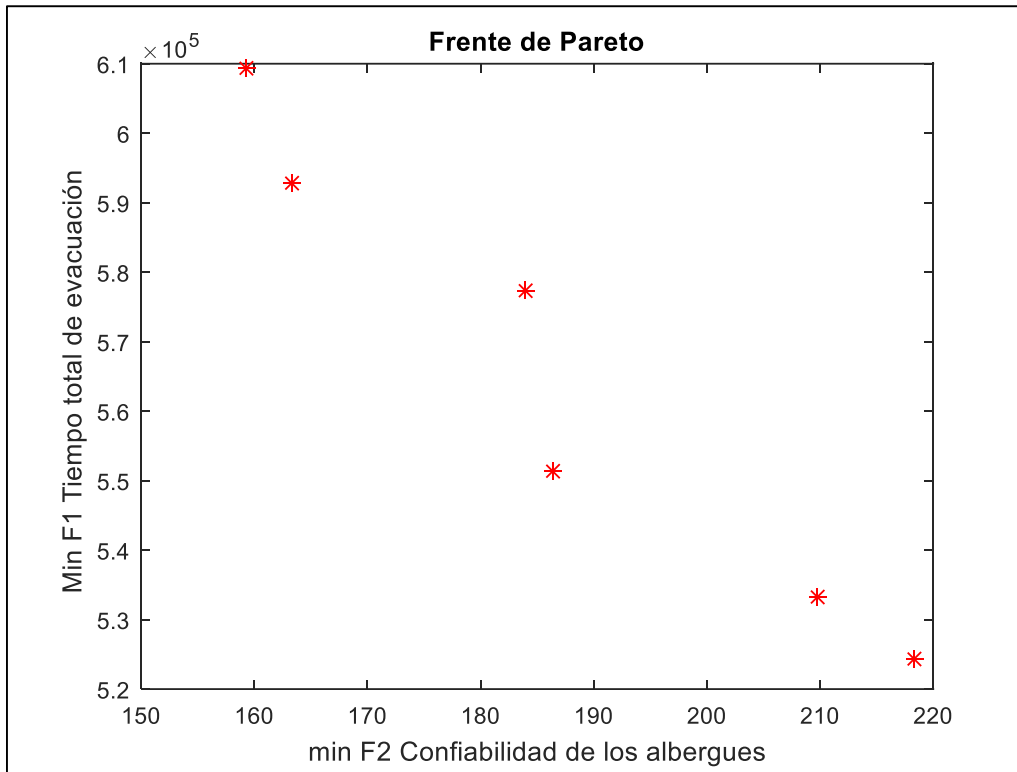


Tabla 12 Soluciones de Pareto (100 individuos, 20 generaciones) para el escenario 2 (t=7)

Solución N°	Número de albergues abiertos	Función objetivo 1 (Tiempo en s)	Función objetivo 2 (Confiabilidad)
1	22	609272	159.2
2	25	592712	163.324
3	29	577235	183.949
4	32	551296	186.303
5	30	533210	209.743
6	37	524437	218.342

La figura 24 ilustra la solución óptima de Pareto con base en la función objetivo 1 (minimización del tiempo total de evacuación), y la figura 25 expone la solución óptima de Pareto según el objetivo 2 (minimización de la confiabilidad total de los

albergues habilitados), representando las soluciones 6 y 1 de la tabla 12, respectivamente.

Figura 24. Solución minimizando el tiempo total de evacuación (Escenario 2)

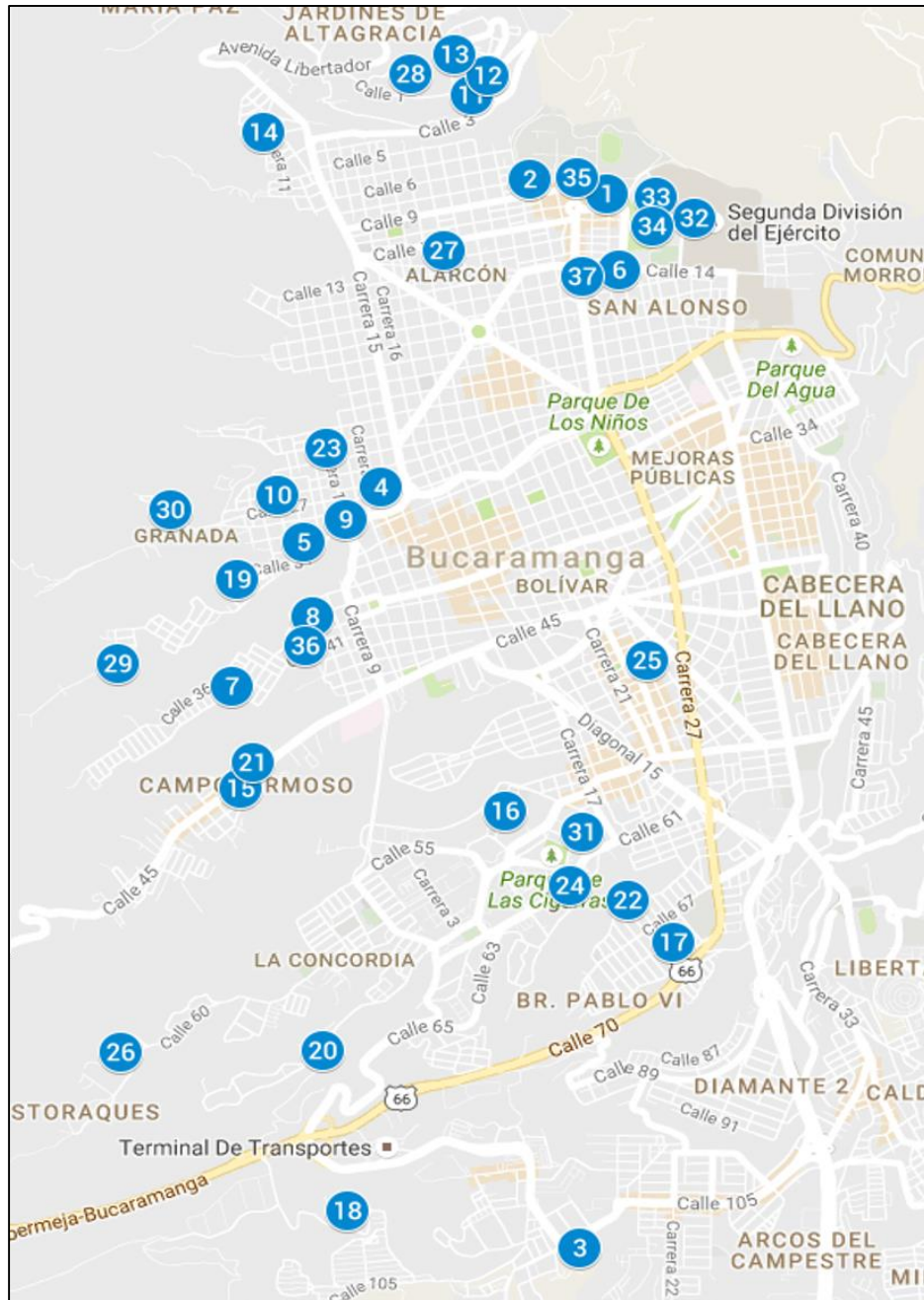
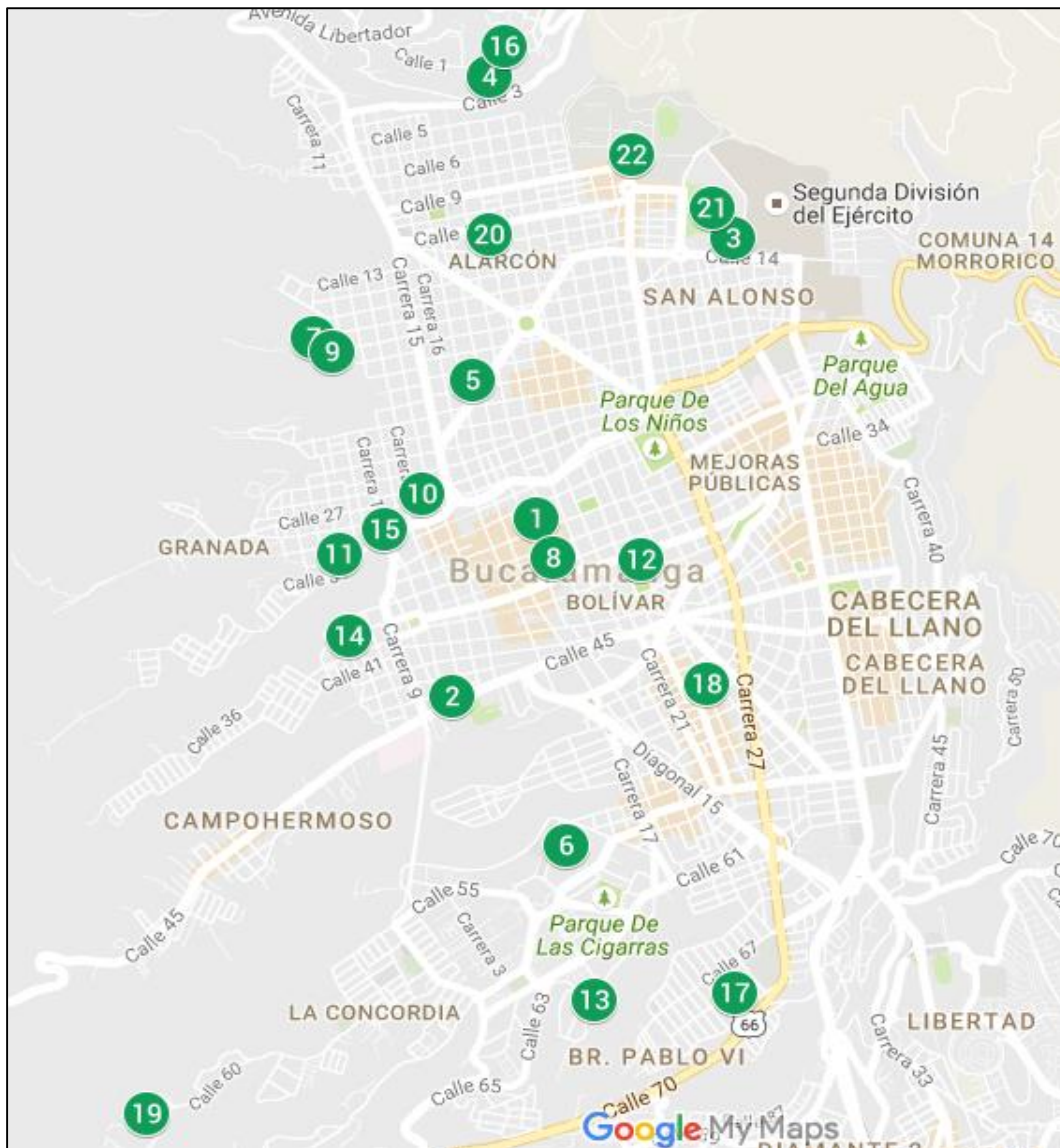


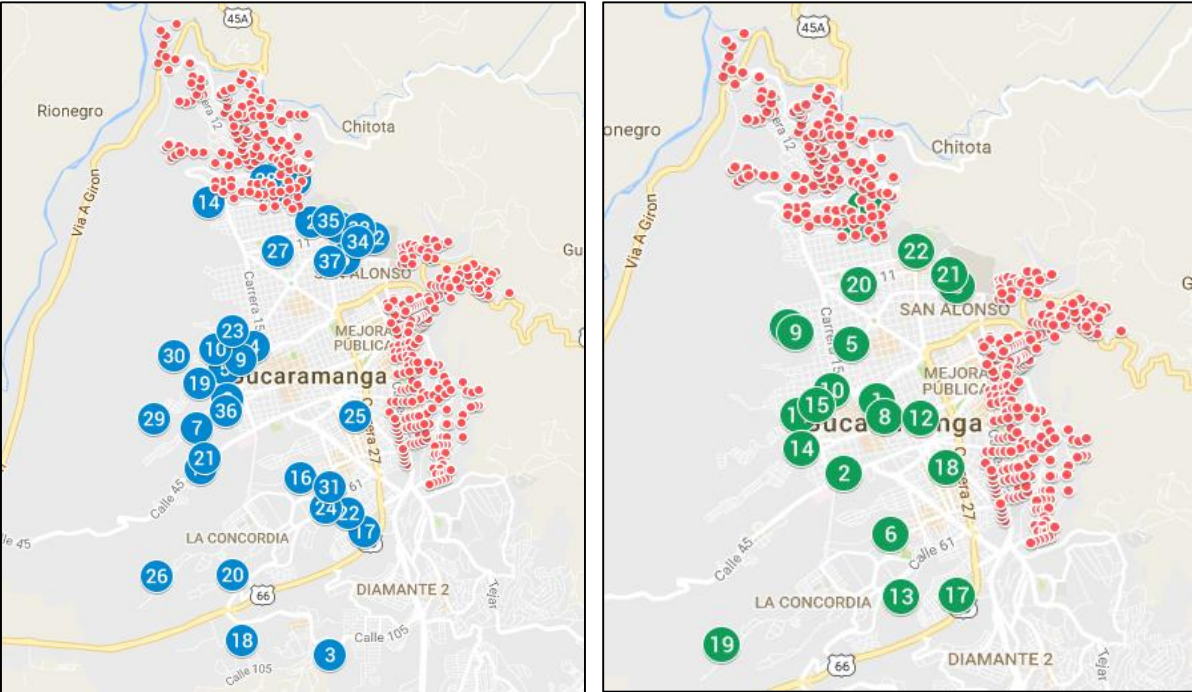
Figura 25. Solución minimizando la confiabilidad total de los albergues abiertos (Escenario 2)



En la figura 24 (solución 6) se habilitan 37 albergues, está solución corresponde al tiempo total de evacuación más corto entre las soluciones obtenidas para este escenario. Comparado con la figura 24, un número menor de albergues son seleccionados en la figura 25 (solución 1) obteniendo un valor menor en la función de confiabilidad. Se requieren más albergues respecto al escenario 1, ya que en el escenario 2 la demanda es mayor. La distribución de los clientes respecto a los

albergues seleccionados en las soluciones estudiadas se presenta en la figura 26a y 26b. A diferencia del escenario anterior, en ambas soluciones se observa: a) dispersión de los albergues en la ciudad, y pequeños grupos por zonas; b) el algoritmo intenta habilitar albergues en las zonas con índice de vulnerabilidad menor a 6, y c) al abrir más albergues es más probable que se subutilice la capacidad de estos. Aunque algunos nodos clientes son asignados a albergues relativamente cercanos, otros son enviados a albergues que se encuentran a más de 1 hora de recorrido. Existen zonas que por su ubicación, no tienen albergues a una distancia prudente con capacidad suficiente para refugiar la demanda de sus nodos, por lo que estos son enviados a albergues lejanos.

Figura 26. Albergues habilitados y puntos de clientes en (a) la solución minimizando tiempo, (b) la solución minimizando confiabilidad



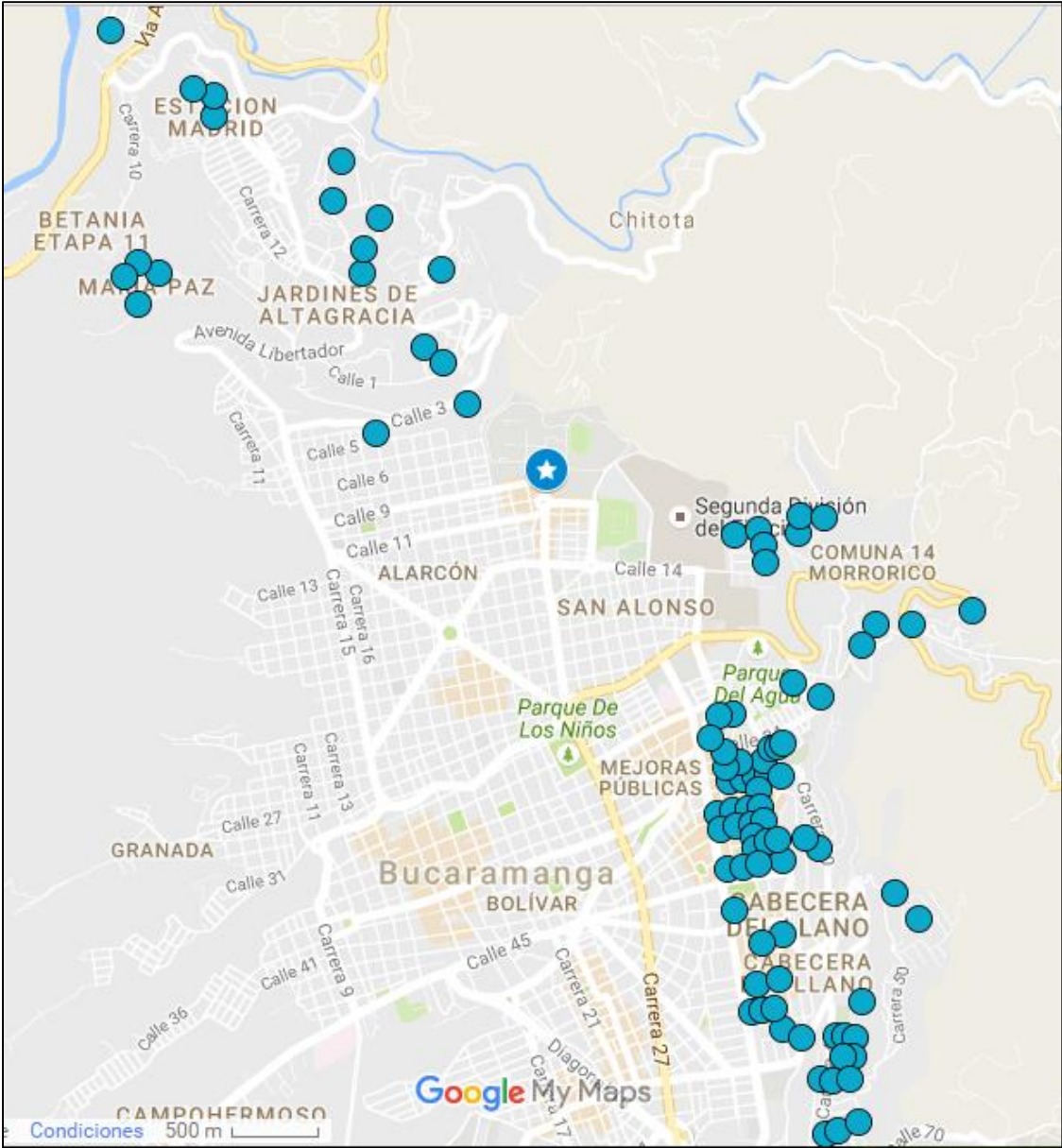
(a)

(b)

Las figuras 27 y 28 muestran los nodos clientes asignados al único albergue que es seleccionado en las soluciones estudiadas para ambos escenarios, el cual corresponde a la Universidad Industrial de Santander UIS (representando por una estrella en las figuras 27 y 28), un albergue de tipo educativo, con capacidad de

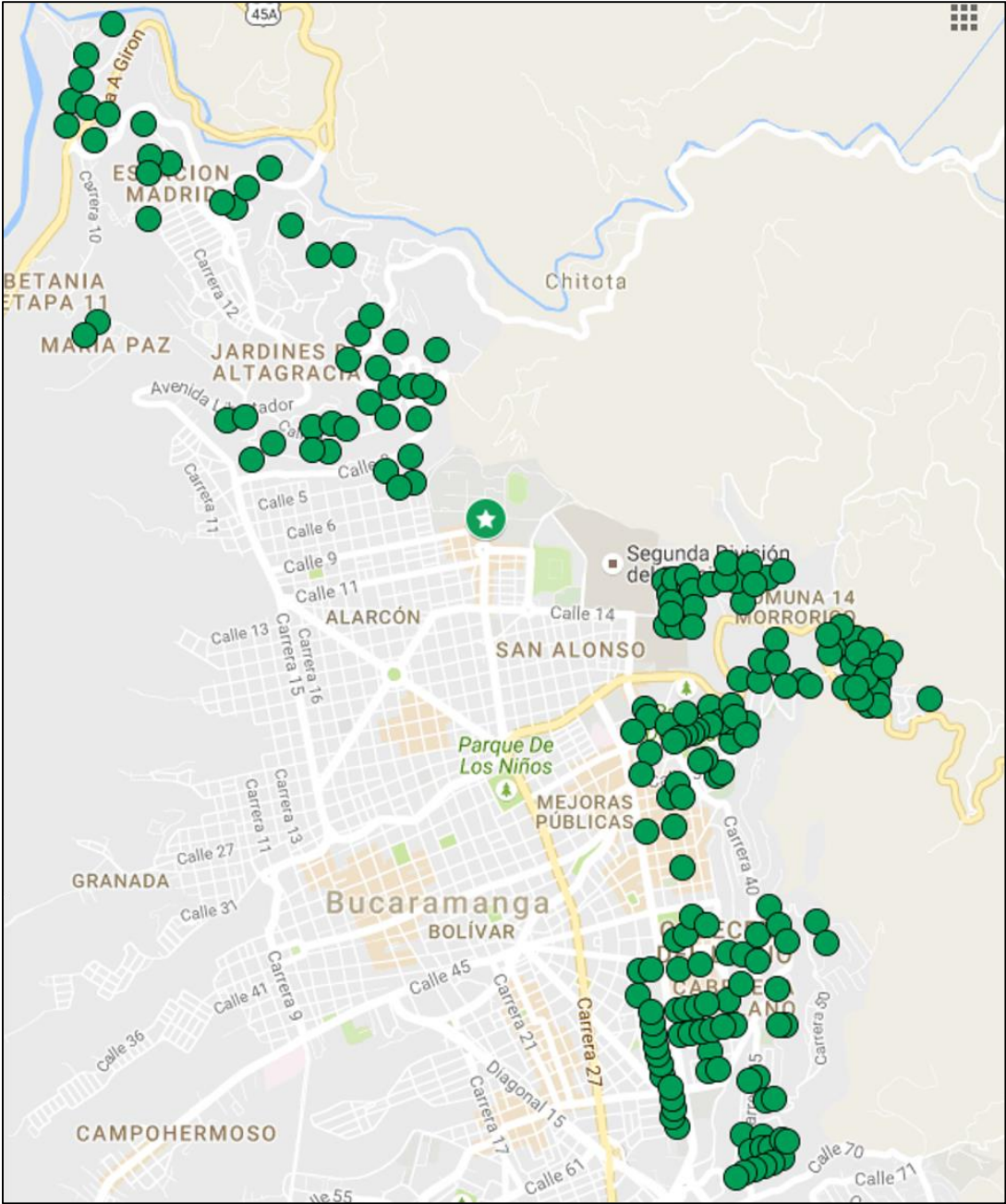
9863 personas y un índice de vulnerabilidad de 1.305. Al ser el nodo con mayor capacidad y estar ubicado en una zona de baja vulnerabilidad sísmica, la UIS, es abierto en muchas de las soluciones generadas por el algoritmo; sin embargo en muchos casos su capacidad utilizada no llega ni al 10%.

Figura 27 Asignación de clientes al nodo Universidad Industrial de Santander en la solución minimizando el tiempo total de evacuación (Escenario 2)



En la figura 27 se asigna un número menor de clientes respecto a la figura 28, esto se debe a que en la solución de la que hace parte la figura 28 (figura 25), se habilitan menos albergues por lo que se debe aprovechar la capacidad de los que se han abierto

Figura 28. Asignación de clientes al nodo Universidad Industrial de Santander en la solución minimizando la confiabilidad (Escenario 2)



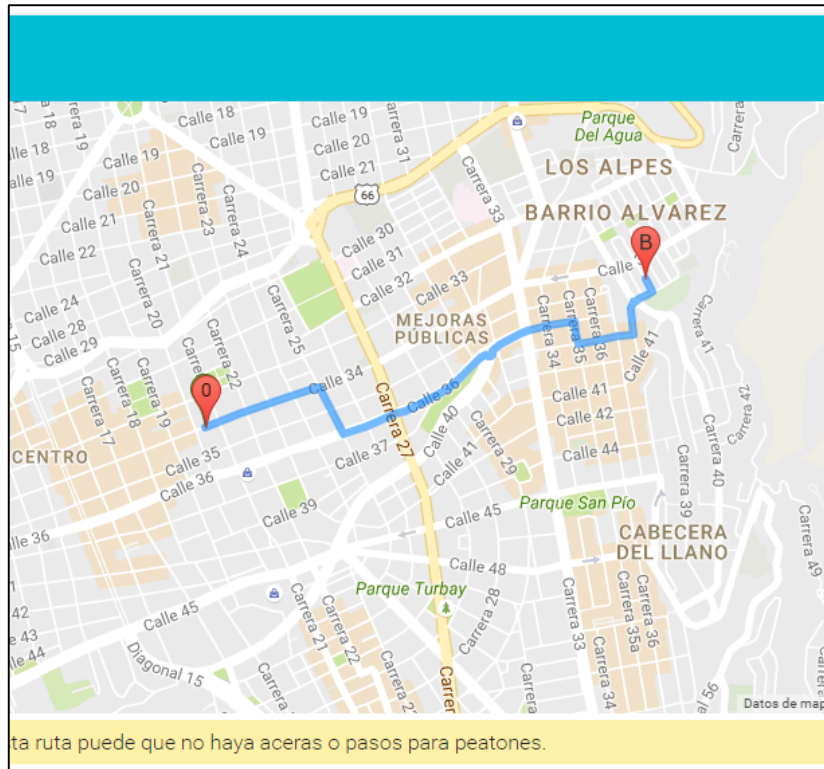
La mayoría de los clientes asignados a la UIS en la figura 28 están ubicados en la zona 12, zona 9A y la zona 11 de la zonificación geomórfica a una distancia relativamente cercana; mientras que en la figura 27 se observa que la mayoría de nodos clientes corresponden a la zona 11, con baja participación de las otras zonas. De manera similar al escenario anterior, en este escenario al haber menos albergues habilitados, los clientes son enviados a albergues lejanos, es por esto, que la solución de menor confiabilidad tiene un mayor tiempo de evacuación total.

#### ▪ INDICACIONES

Para este escenario se encontró que las rutas que se generan en las soluciones estudiadas son en promedio más cortas que las del escenario 1 aunque se presentan trayectos de más de una hora de recorrido. Un ejemplo de una ruta generada para la solución basada en la minimización de la confiabilidad total se expone en la figura 29. El destino es el puntero con el valor de cero correspondiente al Parque Centenario (nodo 1 en la figura 25) mientras que el nodo cliente está ubicado en la zona 9A (Comuna Oriental, puntero B en la figura 29). El recorrido sería de 2.1 km y tomaría 30 minutos aproximadamente, siguiendo las indicaciones:

1. Dirígete al este por Cl 34 hacia Cra 21 (0.4 km )
2. Gire a la derecha hacia Cra 25 (0.2 km)
3. Gire a la izquierda hacia Cl 36, pasa una rotonda (0.9 km)
4. Gire a la derecha hacia la Cra 35 (80 metros)
5. Gire a la izquierda hacia Cl 37. (0.2 km)
6. Gire a la izquierda hacia Cra 38 (0.1 km)
7. Gire a la derecha hacia Cl 35 (78 metros)
8. Gire a la izquierda hacia Cra 40, el destino está a la derecha (53 metros)

Figura 29 Ejemplo de una ruta e indicaciones para dirigirse a un albergue desde un nodo cliente (Minimizando confiabilidad)



**A** Cl. 34 #20-2 a 20-100, Bucaramanga, Santander, Colombia

2,1 km. 30 min aproximadamente

1. Dirígete al este por Cl. 34 hacia Cra. 21	0,4 km
➡ 2. Gira a la derecha hacia Cra. 25	0,2 km
⬅ 3. Gira a la izquierda hacia Cl. 36	0,9 km
Pasa una rotonda	
➡ 4. Gira a la derecha hacia Cra. 35	80 m
⬅ 5. Gira a la izquierda hacia Cl. 37	0,2 km
⬅ 6. Gira a la izquierda hacia Cra. 38	0,1 km
➡ 7. Gira a la derecha hacia Cl. 35	78 m
⬅ 8. Gira a la izquierda hacia Cra. 40	53 m
El destino está a la derecha.	

**B** Cra. 40 #34-1 a 34-135, Bucaramanga, Santander, Colombia

## 7 CONCLUSIONES

La contribución más importante de esta investigación es el desarrollo de una herramienta computacional que integra las decisiones de localización y ruteo para la planeación de la evacuación en desastres por sismos, empleando un enfoque de optimización evolutiva multi objetivo. Esta integración se realizó mediante el uso del sistema de información geográfico de Google Maps, y un algoritmo memético compuesto por un NSGA II y un procedimiento de búsqueda local.

La validación del algoritmo mediante instancias de la literatura, permitió identificar que las estrategias utilizadas para la explotación de las soluciones mediante movimientos de mejora, no son eficientes en algunos casos. En la comparación de los resultados obtenidos respecto al MAPM, el algoritmo propuesto alcanzó en diferentes instancias el valor del costo de depósitos del MAPM; sin embargo, nunca logró igualar el costo de la ruta.

El procedimiento elitista del algoritmo NSGA II aporta un conjunto de soluciones óptimas de Pareto en lugar de un solo objetivo, ofreciendo al usuario de la herramienta diferentes opciones de solución de acuerdo a sus necesidades, lo cual resulta oportuno en el campo de la logística humanitaria, donde existen diferentes objetivos en conflicto y resulta muy difícil satisfacerlos a todos.

Por otra parte, esta investigación presenta un estudio de caso de la ciudad de Bucaramanga. Con el propósito de implementar el modelo propuesto se evaluaron dos posibles escenarios de intensidades sísmicas para la ciudad. Se encontró que dado que el problema considera el ruteo de vehículos, la capacidad de estos influye en el resultado del algoritmo sobre la función de tiempo. Sin embargo, en condiciones reales de evacuación no se presenta tal ruteo. Se evidencia que el problema de la planeación de la evacuación considerando la localización de albergues y la identificación de rutas de evacuación, puede reducirse a un problema de localización-asignación manteniendo los objetivos establecidos.

Se encontraron mejores valores para las funciones en el segundo escenario donde se considera una demanda mayor, se concluye que si no se tiene en cuenta un costo de apertura, un mayor número de albergues proporcionaría un mejor balance entre los dos objetivos. Así mismo, aunque el algoritmo encuentra soluciones aceptables, asigna clientes a albergues que están a más de 1 hora a pie, lo cual bajo condiciones reales de evacuación representa una opción no favorable para los evacuados. En algunas soluciones esto se presenta, porque el algoritmo no está diseñado para fraccionar la demanda de un nodo cliente, ni realizar entregas divididas.

## 8 RECOMENDACIONES

Se demuestra la relevancia de este tipo de estudios en la ciudad lo cual requiere futuras investigaciones. La herramienta puede ser modificada para ser aplicada a otros problemas en gestión de desastres que integran decisiones de localización y ruteo, como la gestión de escombros (disposición y recolección), el suministro de ayudas humanitarias y el manejo de cadáveres. Así mismo, pueden ser incluidos otros objetivos como la minimización del costo total de habilitar los albergues, la minimización de la demanda insatisfecha, y la minimización del riesgo de la ruta.

Las soluciones encontradas seleccionan más albergues de los que son necesarios, por lo cual se sugiere considerar una restricción de capacidad utilizada o una función objetivo que minimice el costo de habilitar un albergue, de forma que se evite la subutilización.

Es necesario el diseño de escenarios más robustos, que incluyan parámetros más confiables y el estado de las vías, permitiendo un acercamiento a la realidad. Sería interesante que para el diseño de las rutas de evacuación se pudiera asignar a cada tramo de la red un parámetro de vulnerabilidad, y que el problema fuera estudiado de forma que cada intersección vial fuese un nodo dentro de la red.

## BIBLIOGRAFIA

- Abounacer, R., Rekik, M., & Renaud, J. (2014a). An exact solution approach for multi-objective location-transportation problem for disaster response. *Computers and Operations Research*, 41(1), 83–93. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2013.08.001>
- Abounacer, R., Rekik, M., & Renaud, J. (2014b). An exact solution approach for multi-objective location–transportation problem for disaster response. *Computers & Operations Research*, 41, 83–93. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2013.08.001>
- Ahmadi, M., Seifi, A., & Tootooni, B. (2015). A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time : A case study on San Francisco district. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75, 145–163.
- Alçada-Almeida, L., Tralhão, L., Santos, L., & Coutinho-Rodrigues, J. (2009). A multiobjective approach to locate emergency shelters and identify evacuation routes in urban areas. *Geographical Analysis*, 41(1), 9–29. <http://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2009.00745.x>
- Altay, N. (2013). Capability-based resource allocation for effective disaster response. *IMA Journal of Management Mathematics*, 24(2), 253–266. <http://doi.org/10.1093/imaman/dps001>
- Asfar, H. M., Prins, C., & Santos, A. C. (2014). Exact and heuristic algorithms for solving the generalized vehicle routing problem with flexible fleet size. *International Transactions in Operational Research*, 21(1), 153–175. <http://doi.org/10.1111/itor.12041>
- Barbat, A. H. (1998). *El riesgos sísmico en el diseño de edificio*. (C. Siderúrgica,

Ed.) (Volumen 5).

- Barrera Navarro, A., & Gomez Hernandez, A. (2016). *Un algoritmo evolutivo para el problema de distribución de recursos post-desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga*. Universidad Industrial de Santander.
- Barreto Robles, M., & Niño Niño, P. (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*. Universidad Industrial de Santander.
- Bish, D. R., Sherali, H. D., & Hobeika, A. G. (2014). Optimal evacuation planning using staging and routing. *Journal of the Operational Research Society*, 65(1), 124–140. <http://doi.org/10.1057/jors.2013.3>
- Bozorgi-Amiri, A., Jabalameli, M. S., & Al-e-Hashem, S. (2013). A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty. *OR Spectrum*, 35(4), 905–933. <http://doi.org/10.1007/s00291-011-0268-x>
- Campbell, A. M., & Jones, P. C. (2011). Prepositioning supplies in preparation for disasters. *European Journal of Operational Research*, 209(2), 156–165. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.08.029>
- Celik, M., Ergun, Ö., & Keskinocak, P. (2015). The Post-Disaster Debris Clearance Problem Under Incomplete Information. *Operations Research*, 63(1), 65–85. <http://doi.org/10.1287/opre.2014.1342>
- Chang, F. S., Wu, J. S., Lee, C. N., & Shen, H. C. (2014). Greedy-search-based multi-objective genetic algorithm for emergency logistics scheduling. *Expert Systems with Applications*, 41(6), 2947–2956. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.10.026>
- Contreras Arevalo, M. A., & Martinez Galvis, A. (2016). *Un problema de localización multiobjetivo en la fase de preparación para desastres por sismos en la ciudad de Bucaramanga*. Universidad Industrial de Santander.

- Coral-Gomez, C. E. (1990). La convergencia de placas en el noroccidente Suramericano y el origen del nido de bucaramanga. *Rev. Acad. Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales.*, 17(66), 521–529.
- Cornuejols, G., Fisher, M. L., & Nemhauser, G. L. (1977). Exceptional Paper— Location of Bank Accounts to Optimize Float: An Analytic Study of Exact and Approximate Algorithms. *Management Science*, 23(8), 789–810. <http://doi.org/10.1287/mnsc.23.8.789>
- Coutinho-Rodrigues, J., Tralhão, L., & Alçada-Almeida, L. (2012). Solving a location-routing problem with a multiobjective approach: the design of urban evacuation plans. *Journal of Transport ...*, 22, 206–218. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.01.006>
- Cruz Roja Colombiana. (2008). *Manual Nacional para el Manejo de Albergues Temporales*. Retrieved from [http://www.cruzrojacolombiana.org/sites/default/files/manual albergues temporales.pdf](http://www.cruzrojacolombiana.org/sites/default/files/manual_albergues temporales.pdf)
- Das, R., & Hanaoka, S. (2014). Relief inventory modelling with stochastic lead-time and demand. *European Journal of Operational Research*, 235(3), 616–623. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.042>
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T. (2000). A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II (pp. 849–858). Springer Berlin Heidelberg. [http://doi.org/10.1007/3-540-45356-3\\_83](http://doi.org/10.1007/3-540-45356-3_83)
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197. <http://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Dias, A. H. F., & de Vasconcelos, J. A. (2002). Multiobjective genetic algorithms applied to solve optimization problems. *IEEE Transactions on Magnetics*, 38(2),

1133–1136. <http://doi.org/10.1109/20.996290>

Döyen, A., Aras, N., & Barbarosoğlu, G. (2012). A two-echelon stochastic facility location model for humanitarian relief logistics. *Optimization Letters*, 6(6), 1123–1145. <http://doi.org/10.1007/s11590-011-0421-0>

Drexl, M., & Schneider, M. (2015). A survey of variants and extensions of the location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 241(2), 283–308. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.08.030>

Du, L., & Peeta, S. (2014). A Stochastic Optimization Model to Reduce Expected Post-Disaster Response Time Through Pre-Disaster Investment Decisions. *Networks and Spatial Economics*, 14(2), 271–295. <http://doi.org/10.1007/s11067-013-9219-1>

Duhamel, C., Lacomme, P., Prins, C., & Prodhon, C. (2008). *A memetic approach for the capacitated location routing problem. EU-ME 2008 (EURO Working Group on Metaheuristics.* Retrieved from <http://webhost.ua.ac.be/eume/workshops/eume08/papers/paper42.pdf>

Fogli, D., & Guida, G. (2013). Knowledge-centered design of decision support systems for emergency management. *Decision Support Systems*, 55(1), 336–347. <http://doi.org/10.1016/j.dss.2013.01.022>

Galindo, G., & Batta, R. (2013). Prepositioning of supplies in preparation for a hurricane under potential destruction of prepositioned supplies. *Socio-Economic Planning Sciences*, 47(1), 20–37. <http://doi.org/10.1016/j.seps.2012.11.002>

Garrido, R. a., Lamas, P., & Pino, F. J. (2015). A stochastic programming approach for floods emergency logistics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75, 18–31. <http://doi.org/10.1016/j.tre.2014.12.002>

Goerigk, M., Deghdak, K., & Heßler, P. (2014). A comprehensive evacuation planning model and genetic solution algorithm. *Transportation Research Part E:*

*Logistics and Transportation Review*, 71, 82–97.  
<http://doi.org/10.1016/j.tre.2014.08.007>

Görmez, N., Köksalan, M., & Salman, F. S. (2010). Locating disaster response facilities in Istanbul. *Journal of the Operational Research Society*, 62(7), 1239–1252. <http://doi.org/10.1057/jors.2010.67>

Guha-sapir, D., Hoyois, P., & Below, R. (2014). *Annual Disaster Statistical Review 2014: The numbers and trends. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)*. Retrieved from [http://www.cred.be/sites/default/files/ADSR\\_2010.pdf](http://www.cred.be/sites/default/files/ADSR_2010.pdf)

Hassanzadeh, A., Mohseninezhad, L., Tirdad, A., Dadgostari, F., & Zolfagharinia, H. (2009). *Facility Location*. (R. Zanjirani Farahani & M. Hekmatfar, Eds.). Heidelberg: Physica-Verlag HD. <http://doi.org/10.1007/978-3-7908-2151-2>

Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones* (9th ed.). McGraw-Hill. Retrieved from <http://es.slideshare.net/waltervillarreal376/introduccion-a-la-investigacion-de-operaciones-9na-edicion-frederick-s-hillier-gerald-j-lieberman>

Holguín-Veras, J., Jaller, M., Van Wassenhove, L. N., Pérez, N., & Wachtendorf, T. (2012). On the unique features of post-disaster humanitarian logistics. *Journal of Operations Management*, 30(7–8), 494–506. <http://doi.org/10.1016/j.jom.2012.08.003>

Hu, Z. H., & Sheu, J. B. (2013). Post-disaster debris reverse logistics management under psychological cost minimization. *Transportation Research Part B: Methodological*, 55, 118–141. <http://doi.org/10.1016/j.trb.2013.05.010>

Hua-li, S., Xun-qing, W., & Yao-feng, X. (2012). A Bi-level Programming Model for a Multi-facility Location-Routing Problem in Urban Emergency System. In *Engineering Education and Management* (pp. 75–80). Springer Berlin Heidelberg. [http://doi.org/10.1007/978-3-642-24823-8\\_12](http://doi.org/10.1007/978-3-642-24823-8_12)

- IMEBU, & UIS, E. de E. (2008). *MERCADO LABORAL Área Metropolitana de Bucaramanga*.
- Jin, S., Jeong, S., Kim, J., & Kim, K. (2015). A logistics model for the transport of disaster victims with various injuries and survival probabilities. *Annals of Operations Research*, 230(1), 17–33. <http://doi.org/10.1007/s10479-013-1515-0>
- Karaoglan, I., & Altiparmak, F. (2014). A memetic algorithm for the capacitated location-routing problem with mixed backhauls. *Computers and Operations Research*, 55, 200–216. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2014.06.009>
- Karp, R. M. (1972). Reducibility among Combinatorial Problems. In *Complexity of Computer Computations* (pp. 85–103). Boston, MA: Springer US. [http://doi.org/10.1007/978-1-4684-2001-2\\_9](http://doi.org/10.1007/978-1-4684-2001-2_9)
- Kelle, P., Schneider, H., & Yi, H. (2014). Decision alternatives between expected cost minimization and worst case scenario in emergency supply - Second revision. *International Journal of Production Economics*, 157, 250–260. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.06.009>
- Kunz, N., Reiner, G., & Gold, S. (2014). Investing in disaster management capabilities versus pre-positioning inventory: A new approach to disaster preparedness. *International Journal of Production Economics*, 157, 261–272. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.11.002>
- Lassiter, K., Khademi, A., & Taaffe, K. M. (2015). A robust optimization approach to volunteer management in humanitarian crises. *International Journal of Production Economics*, 163, 97–111. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.018>
- Li, J., Li, Q., Liu, C., Khan, S. U., & Ghani, N. (2014). Community-based collaborative information system for emergency management. *Computers & Operations Research*, 42, 116–124. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2012.03.018>
- Li, S., Ma, Z., & Zheng, B. (2014). Dynamic multi-objective location-routing problem

- in post-earthquake logistics system. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 6(6), 1515–1520.
- Li, S., & Zhou, H. (2014). Optimization model of fuzzy location-routing problem of victim search in flood disaster. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 6(6), 2080–2085.
- Maldonado, E., & Chio, G. (2005). Identificación de las zonas sísmicas más vulnerables en la ciudad de Bucaramanga. *UIS Ingenierías*, 4(2), 99–116.
- Maldonado, E., & Chio, G. (2008). *Vulnerabilidad sísmica en centros urbanos*.
- Martel, A., Benmoussa, A., Chouinard, M., Klibi, W., & Kettani, O. (2012). Designing global supply networks for conflict or disaster support: the case of the Canadian Armed Forces. *Journal of the Operational Research Society*, 64(4), 577–596. <http://doi.org/10.1057/jors.2012.65>
- Martinez, E. J. (2012, August 22). ¿Cómo está distribuida en cifras Bucaramanga? *Vanguardia Liberal*, p. 1. Bucaramanga. Retrieved from <http://www.vanguardia.com/santander/bucaramanga/infografia-170668-como-esta-distribuida-en-cifras-bucaramanga>
- McCoy, J. H., & Brandeau, M. (2011). Efficient stockpiling and shipping policies for humanitarian relief: UNHCR's inventory challenge. *OR Spectrum*, 33, 673–698. <http://doi.org/10.1007/s00291-011-0237-4>
- Michalewicz, Z. (1996). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs* (3rd ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <http://doi.org/10.1007/978-3-662-03315-9>
- Min, H., Jayaraman, V., & Srivastava, R. (1998). Combined location-routing problems: A synthesis and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 108(1), 1–15. [http://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00172-0](http://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00172-0)

- Mingang, Z., Zengshou, C., & Xiaoyan, W. (2009). Research on location-routing problem of relief system based on emergency logistics. In *Industrial Engineering and Engineering Management, 2009. IE&EM'09. 16th International Conference on* (pp. 228–232). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICIEEM.2009.5344599>
- Moscato, P. (1999). Memetic algorithm: a short introduction. In *New ideas in Optimization* (pp. 219–234).
- Moscato, P., & Cotta, C. (2010). A Modern Introduction to Memetic Algorithms (pp. 141–183). Springer US. [http://doi.org/10.1007/978-1-4419-1665-5\\_6](http://doi.org/10.1007/978-1-4419-1665-5_6)
- Nagarajan, M., Shaw, D., & Albores, P. (2012). Disseminating a warning message to evacuate: A simulation study of the behaviour of neighbours. *European Journal of Operational Research*, 220(3), 810–819. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.02.026>
- Nagy, G., & Salhi, S. (2007). Location-routing: Issues, models and methods. *European Journal of Operational Research*, 177(2), 649–672. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.04.004>
- Najafi, M., Farahani, R. Z., De Brito, M. P., & Dullaert, W. (2015). Location and Distribution Management of Relief Centers: A Genetic Algorithm Approach. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGY & DECISION MAKING*, 14(4), 769–803. <http://doi.org/10.1142/S0219622014500382>
- Naji-Azimi, Z., Renaud, J., Ruiz, A., & Salari, M. (2012). A covering tour approach to the location of satellite distribution centers to supply humanitarian aid. *European Journal of Operational Research*, 222(3), 596–605. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.05.001>
- Noyan, N. (2012). Risk-averse two-stage stochastic programming with an application to disaster management. *Computers & Operations Research*, 39(3), 541–559. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2011.03.017>
- Onan, K., Ulengin, F., & Sennaroglu, B. (2015). An evolutionary multi-objective

- optimization approach to disaster waste management: A case study of Istanbul, Turkey. *Expert Systems with Applications*, 42(22), 8850–8857. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.07.039>
- Ortuño, M. T., Cristóbal, P., Ferrer, J. M., Martín-Campo, F. J., Muñoz, S., Tirado, G., & Vitoriano, B. (2013). Decision Aid Models and Systems for Humanitarian Logistics. A Survey. In *Decision Aid Models for Disaster Management and Emergencies* (Vol. 7, pp. 17–39). <http://doi.org/10.2991/978-94-91216-74-9>
- Paul, J. A., & Wang, X. (2015). Robust optimization for United States Department of Agriculture food aid bid allocations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 82, 129–146. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2015.08.001>
- Peeta, S., Sibel Salman, F., Gunec, D., & Viswanath, K. (2010). Pre-disaster investment decisions for strengthening a highway network. *Computers and Operations Research*, 37(10), 1708–1719. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2009.12.006>
- Pen, M., Peng, Y., & Chen, H. (2014). Post-seismic supply chain risk management: A system dynamics disruption analysis approach for inventory and logistics planning. *Computers and Industrial Engineering*, 42, 14–24. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2013.03.003>
- Pramudita, A., Taniguchi, E., & Qureshi, A. (2014). Location and Routing Problems of Debris Collection Operation after Disasters with Realistic Case Study. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 125, 1–15. <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1487>
- Preece, G., Shaw, D., & Hayashi, H. (2015). Application of the Viable System Model to analyse communications structures: A case study of disaster response in Japan. *European Journal of Operational Research*, 243(1), 312–322. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.11.026>

- Prins, C., Prodhon, C., & Wolfler Calvo, R. (2006). A Memetic Algorithm with Population Management ( MA | PM ) for the Capacitated Location-Routing Problem. *EvoCOP*, 183–194. [http://doi.org/10.1007/978-3-540-88439-2\\_4](http://doi.org/10.1007/978-3-540-88439-2_4)
- Prodhon, C. (2006). *Le Problème de Localisation-Routage*.
- Prodhon, C. (2011). A hybrid evolutionary algorithm for the periodic location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 210(2), 204–212. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.09.021>
- Prodhon, C., & Prins, C. (2008). A Memetic Algorithm with Population Management ( MA | PM ) for the Periodic Location-Routing Problem. In *Lecture Notes in Computer Science*, (pp. 43–57).
- Prodhon, C., & Prins, C. (2014). A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 1–17. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.01.005>
- Rachaniotis, N. P., Dasaklis, T. K., & Pappis, C. P. (2012). A deterministic resource scheduling model in epidemic control: A case study. *European Journal of Operational Research*, 216(1), 225–231. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.07.009>
- Rath, S., & Gutjahr, W. J. (2014a). A math-heuristic for the warehouse location-routing problem in disaster relief. *Computers and Operations Research*, 42, 25–39. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2011.07.016>
- Rath, S., & Gutjahr, W. J. (2014b). A math-heuristic for the warehouse location-routing problem in disaster relief. *Computers & Operations Research*, 42, 25–39. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2011.07.016>
- Rawls, C. G., & Turnquist, M. A. (2010). Pre-positioning of emergency supplies for disaster response. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(4), 521–534. <http://doi.org/10.1016/j.trb.2009.08.003>

- Rivera, J. C., Afsar, H. M., & Prins, C. (2015). A multistart iterated local search for the multitrip cumulative capacitated vehicle routing problem. *Computational Optimization and Applications*, 61(1), 159–187. <http://doi.org/10.1007/s10589-014-9713-5>
- Rodríguez, J. T., Vitoriano, B., Montero, J., & Kecman, V. (2011). A disaster-severity assessment DSS comparative analysis. *OR Spectrum*, 33(3), 451–479. <http://doi.org/10.1007/s00291-011-0252-5>
- Rottkemper, B., Fischer, K., Blecken, A., & Danne, C. (2011). Inventory relocation for overlapping disaster settings in humanitarian operations. *OR Spectrum*, 33(3), 721–749. <http://doi.org/10.1007/s00291-011-0260-5>
- Salhi, S., & Rand, G. K. (1989). The effect of ignoring routes when locating depots. *European Journal of Operational Research*, 39(2), 150–156. [http://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90188-4](http://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90188-4)
- Salmerón, J., & Apte, A. (2010). Stochastic optimization for natural disaster asset prepositioning. *Production and Operations Management*, 19(5), 561–574. <http://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2009.01119.x>
- Ukkusuri, S. V., & Yushimito, W. F. (2009). Location Routing Approach for the Humanitarian Prepositioning Problem. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2089(1), 18–25. <http://doi.org/10.3141/2089-03>
- Wang, H., Du, L., & Ma, S. (2014). Multi-objective open location-routing model with split delivery for optimized relief distribution in post-earthquake. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 69, 160–179. <http://doi.org/10.1016/j.tre.2014.06.006>
- Yi, W., & Özdamar, L. (2007). A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 1177–1193. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.03.077>

- Yildiz, H., Johnson, M. P., & Roehrig, S. (2012). Planning for meals-on-wheels: algorithms and application. *Journal of the Operational Research Society*, 64(10), 1540–1550. <http://doi.org/10.1057/jors.2012.129>
- Zhang, Y., Qi, M., Lin, W.-H., & Miao, L. (2015). A metaheuristic approach to the reliable location routing problem under disruptions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 83(9), 90–110. <http://doi.org/10.1016/j.tre.2015.09.001>
- Zheng, Y., Ling, H., Shi, H.-H., Chen, H.-S., & Chen, S. (2014). Emergency railway wagon scheduling by hybrid biogeography-based optimization. *Computers & Operations Research*, 43, 1–8. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2013.09.002>