

**Un problema de localización-ruteo dinámico capacitado con demandas difusas para la
atención post-desastre sísmico en la ciudad de Bucaramanga.**

Lizeth Carolina Mejía Vargas, Jessica Alejandra Perdomo Jiménez

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Industrial

Director

Henry Lamos Díaz

Ph.D. Física – Matemática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2019

Dedicatorias

Doy Gracias a Dios por haberme permitido cumplir esta meta ¡Sin la voluntad de Dios no sería posible!

Este Triunfo lo dedico a mis padres quienes han sido mi apoyo incondicional en todo este proceso, Doy gracias porque hoy soy quien soy gracias a ellos.

Lizeth Carolina Mejía

A Dios por su inmenso amor y fidelidad.

A mis padres y hermano por su incondicional apoyo, motivación, confianza y amor.

A mis abuelos por ser parte primordial de felicidad en mi infancia y mi vida.

A Alexander Ávila por su amor, dedicación y apoyo para este triunfo.

Jessica Alejandra Perdomo

Agradecimientos

A Dios, por permitirnos culminar nuestra carrera satisfactoriamente.

Al grupo de investigación OPALO, por las herramientas brindadas en la ejecución del proyecto.

Al profesor Henry Lamos por ser nuestro Director, por su asesoría brindada durante esta investigación y por su amabilidad.

Tabla de Contenido

Introducción	16
1. Planteamiento del problema	18
2. Justificación	20
3. Objetivos.....	24
3.1 Objetivo General	24
3.2 Objetivos específicos	24
4. Revisión de la literatura	25
4.1 Análisis Bibliométrico	25
4.2 Análisis preliminar de la literatura	30
5. Marco Teórico	38
5.1 Logística humanitaria.....	38
5.2 Desastres	39
5.3 Lógica Fuzzy.....	39
5.3.1 Conjuntos Fuzzy	40
5.3.2 Función de Membresía.....	41
5.3.3 Variable lingüística.....	41
5.4 Algoritmo Genético.....	41
5.4.1 Construcción del Algoritmo Genético	42

5.4.1.1 Cromosoma	43
5.4.1.2 Manejo con inviabilidad	44
5.4.1.3 Generación población inicial	45
5.4.1.4 Selección	45
5.4.1.5 Cruce	46
5.4.1.6 Mutación	46
5.4.1.8 Fin al algoritmo	47
5.5 Teoría de la credibilidad.....	47
6. Problema DCLRP-FD.....	50
6.1 Descripción del problema	50
6.2 La credibilidad y el índice de preferencia.....	50
6.2.1 Fallo de ruta	52
7. Formulación del modelo matemático.....	54
7.1 Supuestos	54
7.2 Conjuntos y parámetros	56
7.3 Decisión de variables	57
7.4 Función objetivo	58
8. Descripción del algoritmo genético	60
8.1 Establecimiento de depósitos.....	60
8.2 Agrupación de clientes	61

8.3 Asignación de grupos a depósitos	62
8.3.1 Diagrama de flujo de asignación de grupos a depósitos.	63
8.4 Proceso de ruteo	64
8.4.1 Representación genética de los individuos	64
8.4.2 Población inicial.....	65
8.4.3 Operador de selección	66
8.4.4 Operador de cruce	67
8.4.5 Operador de mutación	70
8.4.6 Simulación estocástica	71
9. Validación del algoritmo genético	72
9.1 Resultados de la validación.....	72
9.2 Análisis de sensibilidad para parámetros DPI y API	74
10. Caso estudio para la ciudad de Bucaramanga.....	76
11. Resultados	79
11.1 Solución factible HHA vs AG.....	80
12. Conclusiones	82
13. Recomendaciones	83
Referencias Bibliográficas	84

Lista de Figuras

Figura 1. Autores más productivos en los últimos 5 años.....	26
Figura 2. Países más productivos VS número de documentos publicados	27
Figura 3. Aduana con palabras claves.....	28
Figura 4. Número de publicaciones anuales por revista.	29
Figura 5. Productividad científica por año. adaptado de R.	30
Figura 6. Función característica de un conjunto fuzzy	40
Figura 7. La codificación de un cromosoma.....	43
Figura 8. El Cromosoma de construcción.....	44
Figura 9. Una variable triangular difusa	49
Figura 10. Diagrama de flujo asignación de grupos	63
Figura 11. Diagrama de flujo genético.	65
Figura 12. Procedimiento del operador selección por torneo.	67
Figura 13. Cromosomas de los padres. P1: Padre 1; P2: Padre 2.	69
Figura 14. Matriz Generación de hijos mediante el operador de cruce aleatorio.	69
Figura 15. Procedimiento del operador cruce aleatorio.	70
Figura 16. Procedimiento del operador mutación.	71
Figura 17. Ilustración del procedimiento de AG.....	72
Figura 18. Consolidación de los resultados de validación del algoritmo genético.	73
Figura 19. Simbología implementada.	78
Figura 20. Ubicación de clientes y CDI. Adaptado de Google Maps.	79

Lista de Tablas

Tabla 1. Cumplimiento de objetivos del proyecto.	18
Tabla 2. Instancias.	73
Tabla 3. Parámetros DPI y API.	74
Tabla 4. Resultados Gaskell67-21x5.	75
Tabla 5. Resultados Gaskell67-32x5a.	76
Tabla 6. Resultados caso Bucaramanga.	77
Tabla 7. Solución factible HHA vs Genético.	82

Lista de Apéndices

(Apéndices en CD adjunto)

Apéndice A Código en Matlab

Apéndice B. Artículo de carácter publicable

Apéndice C. Datos caso de Bucaramanga

Apéndice D. Resultados Computacionales

RESUMEN

TITULO: UN PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN-RUTEO DINÁMICO CAPACITADO CON DEMANDAS DIFUSAS PARA LA ATENCIÓN POST-DESASTRE SÍSMICO EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA *

AUTORES: MEJÍA VARGAS, LIZETH CAROLINA

PERDOMO JIMÉNEZ, JESSICA ALEJANDRA **

PALABRAS CLAVE:

Algoritmo genético, Demanda Difusa, Optimización Dinámica, Logística Humanitaria, Problema Localización-ruteo Capacitado.

DESCRIPCIÓN:

Esta investigación aborda el problema de localización-ruteo dinámico capacitado con demandas difusas para la atención post-desastre sísmico en la ciudad de Bucaramanga. El diseño del modelo es propuesto con un algoritmo genético desarrollado en Matlab, el cual busca minimizar el costo total del sistema teniendo los gastos del depósito, los costos de enrutamiento y costos de oportunidad perdidos debido a la falta de capacidad de servicio en consideración.

Para dar solución al problema de (DCLRP-FD) se valida el algoritmo genético mediante instancias existentes en la literatura donde se refleja la cercanía de resultados comparados con el artículo base de esta investigación “Solving the Dynamic capacitated location-routing problem with fuzzy demands by hybrid heuristic algorithm” propuesto por los autores Ali Nadizadeh y Hasan Hosseini Nasab.

En consideración al caso de la ciudad de Bucaramanga se utilizaron ciento diez y nueve (119) albergues más un (1) centro de distribución tomada como clientes y demandas respectivamente donde se tiene información de la ubicación de los albergues dispuestos ante una emergencia post-desastre, la capacidad de estos y el centro de distribución de recursos, encontrados en el artículo “*An ABC algorithm for solving the post-disaster resources distribution problem, a case study*” (Lamus, Aguilar, Martinez, Barrera, & Hernandez, 2018).

Los resultados propuestos en este proyecto de investigación están enfocados a contribuir en la mitigación de necesidades de personas damnificadas ante una emergencia.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Henry Lamos Díaz, Ph.D. Física – Matemática.

ABSTRACT

TITULO: A PROBLEM OF LOCATION- ROUTING DYNAMIC WITH DIFFUSE DEMANDS FOR POST-DISASTER SEISMIC ATTENTION IN THE CITY OF BUCARAMANGA *

AUTORES: MEJÍA VARGAS, LIZETH CAROLINA

PERDOMO JIMÉNEZ, JESSICA ALEJANDRA **

KEYWORDS: Genetic Algorithm, Diffuse Demand, Dynamic Optimization, Humanitarian Logistics, Location-Trained Tracking Problem

DESCRIPTION:

This research addresses the problem of dynamic localization-routing with the diffuse for post-disaster seismic attention in the city of Bucaramanga. The design of the model is a genetic algorithm developed in Matlab, which seeks to minimize the total cost of the system taking into account the costs of the deposit, the costs of routing and the opportunity costs lost due to the lack of service capacity in the Attention.

To solve the problem of (DCLRP-FD) the genetic algorithm is validated by existing instances in the literature which reflects the closeness of results compared with the base article of this research "Solving the Dynamic capacitated location-routing problem with fuzzy demands by hybrid heuristic algorithm" proposed by the authors Ali Nadizadeh and Hasan Hosseini Nasab.

In consideration of the case of the city of Bucaramanga, one hundred and nineteen (119) shelters plus one (1) distribution center taken as clients and demands were used, respectively, where information is available on the location of shelters prepared for a post-disaster emergency. , the capacity of these and the center of distribution of resources, found in the article "An ABC algorithm for solving the post-disaster resources distribution problem, a case study" (Lamus, Aguilar, Martinez, Barrera, & Hernandez, 2018).

The results proposed in this research project are focused on contributing to the mitigation of the needs of people in an emergency.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Henry Lamos Díaz, Ph.D. Física – Matemática.

Introducción

La evidente dificultad de tomar decisiones en sistemas complejos ha hecho que el hombre busque teorías, herramientas, métodos, etc., que permitan minimizar los factores de riesgo bajo un modelo con una precisión adecuada y en el menor tiempo posible. Cualquier tipo de desastre natural es un reto para las instituciones gubernamentales en lo que respecta a todas las tareas que se deben llevar a cabo después del evento. La solución de los múltiples problemas a los cuales deben afrontar los organismo se abordan a través del uso de la logística humanitaria, definida por la Humanitarian Logistics Conference, como “El proceso de planificar, implementar y controlar de manera eficiente, el flujo y almacenamiento de materiales y de información relacionada, desde el punto de origen al punto de consumo, con el propósito de satisfacer las necesidades de los beneficiarios y aliviar el sufrimiento de la población vulnerable”.

Por lo tanto, como el objetivo fundamental es el de satisfacer las necesidades de las personas afectadas por un desastre lo más rápido posible, en lo que respecta a proveer servicios, materiales y transporte a los involucrados en la asistencia a los damnificados, el presente trabajo de investigación busca desarrollar un modelo en la etapa respuesta al desastre (sismo), la cual solo se lleva a cabo durante el evento e inmediatamente después de su ocurrencia. Durante esta etapa se emplean recursos y procedimientos, en general guiándose por planes ya establecidos, para preservar vidas, propiedades, el medio ambiente y las estructuras sociales, económicas y políticas de la comunidad. Por lo general, algunas de las siguientes actividades deben ser realizadas en esta fase: activar planes, abrir refugios, realizar evacuaciones, búsquedas y rescates.

De acuerdo con lo mencionado este proyecto pretende desarrollar un modelo para resolver el problema de localización-ruteo con periodos de tiempo dinámico, considerando la ambigüedad de la información que se desarrolla en lo que respecta a la incertidumbre en las demandas de los clientes, esto como medio para planificar la selección y asignación de los depósitos y recursos de ayuda humanitaria para satisfacer a la comunidad damnificada. Este problema fue tratado con anterioridad por (Ali Nadizadeh & Hasan, 2014) quienes utilizan un algoritmo heurístico híbrido (HHA) con cuatro fases, incluyendo la simulación estocástica y un método de búsqueda local.

La presente propuesta está organizada de la siguiente manera: En el capítulo 4 se encuentra la revisión de literatura relevante sobre el DCLRP-FD y la lógica difusa. Luego en el capítulo 5 se presenta el marco teórico. En el capítulo 6 se describe el problema a tratar en este trabajo, el DCLRP-FD con lógica fuzzy. En el capítulo 7 se presenta la formulación del modelo matemático propuesto para resolver el problema. En el capítulo 8 se presenta la descripción del AG propuesto, en el capítulo 9 se encuentra la validación del algoritmo genético. Por último, en el capítulo 10 se presenta un caso de estudio para la ciudad de Bucaramanga, en el capítulo 11 se muestran resultados y finalmente en el capítulo 12 y 13 conclusiones recomendaciones.

Tabla 1.
Cumplimiento de objetivos del proyecto.

Objetivo	Cumplimiento
Realizar una revisión literaria sobre modelos usados en la solución de problemas de localización-ruteo dinámico con demandas difusas (DLRP-FD)	Capítulo 4
Realizar una revisión bibliográfica sobre la matemática difusa y su aplicación en problemas de optimización	Capítulo 4
Desarrollar un algoritmo genético para la solución del problema de localización-ruteo dinámico con demandas difusas (DLRP-FD).	Capítulo 8
Validar el algoritmo desarrollado en Matlab para la solución al problema de (DCLRP-FD) mediante casos de prueba estándar existentes en la literatura.	Capítulo 9
Elaborar un artículo académico de carácter publicable basado en los resultados de la investigación.	Apéndice B

1. Planteamiento del problema

En el mundo la atención post-desastre ante los eventos naturales repentinos como el sismo es un tema que ha sido de amplio estudio en los últimos años y de gran importancia en el campo de la logística humanitaria, el área de la investigación de operaciones ha desarrollado modelos de optimización con el fin de contribuir a la solución de problemas que ayudan a suplir las necesidades

básicas de todas las personas afectadas por este tipo de desastre natural (sismo).

En Colombia según estudios de la gestión del riesgo el “86% de la población colombiana se localiza en zonas de amenaza sísmica alta y media” (Campos García, Díaz Giraldo, Rubiano Vargas, Costa Posada, & Ramírez Cortés, 2012). Por lo tanto se han identificado una serie de características propias de la situación post-desastre causada por sismos especialmente en la ciudad de Bucaramanga-Santander debido a la alta vulnerabilidad a este tipo de eventos, ya que se encuentra cerca al segundo nido sísmico (Mesa de los santos) con más intensidad en el mundo, esto se da por “consecuencia de una alta concentración de esfuerzos causada por la convergencia hacia el bloque andino de las placas litosféricas mayores de la región (Caribe, Nazca, Suramérica)” (Velásquez Gómez, 2015). Además, la ciudad presenta fragilidad en construcciones y a sus alrededores existen varias zonas con fallas geológicas, estos factores inciden en el elevado número de temblores constantes en Bucaramanga y su área metropolitana donde la mayor parte de la comunidad bumanguesa no está preparada para cualquier tipo de emergencia ante un sismo.

En vista que durante los últimos años los sismos en la ciudad de Bucaramanga-Santander se han presentado con más periodicidad y han impactado a la comunidad, por tal motivo, nace la importancia de tener diferentes estrategias, planes de apoyo y proyectos de la gestión del riesgo, estudios e investigaciones para mitigar el impacto negativo y a su vez disminuir el peligro.

De acuerdo con la situación descrita anteriormente, el presente trabajo se centra en el problema DCLRP-FD donde se pretende describir las consideraciones y características teniendo en cuenta el problema de localización de instalaciones y enrutamiento de vehículos en conjunto. Salhi y Rand (1989) mostró que la solución del problema de localización sin tener en cuenta la ruta puede conducir a una solución subóptima y afirman que el LRP simultáneamente supera la crítica

anterior. Asimismo, se tiene en cuenta la capacidad definida tanto para los depósitos como para los vehículos.

El LRP ha sido abordado con diferentes enfoques desde la investigación de operaciones con “el objetivo, en la mayoría de los casos, de minimizar el costo de ruteo, es decir, la distancia recorrida, abriendo el menor número de depósitos y utilizando la menor cantidad de vehículos, satisfaciendo las necesidades de los clientes” (Nagy y Salhi, 2007). En nuestra investigación se aborda el problema LRP teniendo en cuenta los periodos de tiempo y las demandas difusas de los nodos clientes. Para determinar soluciones a nuestro problema DCLRP-FD se usará un algoritmo genético considerando el tiempo de respuesta como el factor más importante dentro de la gestión para la asistencia a la población del municipio de Bucaramanga afectada en una situación post-desastre sísmico.

2. Justificación

Actualmente los desastres naturales han causado estragos a nivel mundial, informes de la ONU indicaron que en el año 2017 se registraron 2087 personas muertas, 24.2 millones de personas damnificadas y alrededor de 18 millones de personas desplazadas; también asegura que cada año los fenómenos naturales cuestan a la economía mundial aproximadamente 520 mil millones de dólares llevando la peor parte países de bajos y medianos ingresos donde se ven afectada las actividades básicas, los fondos para salud, educación, protección social y otras necesidades públicas importantes, aunque la mayoría de países terminan recuperándose de estos eventos existen

países donde se genera un crecimiento negativo durante los años próximos ; esto como consecuencia evidente del crecimiento exhaustivo del calentamiento global, aumento de la población y el uso del suelo.

Según estudios en los últimos años los desastres naturales se han presentado con más periodicidad como lo fue el “terremoto de Wenchuan 2008, la congelación de desastres, lluvia en el sur de China 2008, el devastador terremoto del 2011 en Japón, Florida desastre inundación en la India en 2013 y el granizo de desastres en Yancheng en 2016, Jiangsu” (Lei Zhoua, Xianhua Wub, Zeshui Xuc y Hamido Fujitad, 2018).

En el año 2017 se conocen como hechos más recientes: el sismo de 7.0 grados que causó 25 víctimas mortales en Jiuzhaigou, China, un terremoto de 5.7 que causó más de 30 muertos en la parte central de Italia, un sismo de 8.1 grados sacudió la tierra en Chiapas donde un millón 479 mil 576 personas resultaron damnificadas, un temblor de 7.1 grados originado en la ciudad de México Morelos y Puebla donde murieron 228 personas y más de 6 mil resultaron heridas. (Nicolás Ruiz, 2017)

En Colombia la ocurrencia de los desastres naturales cada vez aumenta y son originados por fenómenos hidrometeorológicos como inundaciones, y deslizamientos, lo que requiere articulación y acción oportuna para tener capacidad de respuesta, de hecho, informes del banco mundial de 2012 aseguran que en Colombia ocurrieron 28000 eventos naturales adversos en los últimos 40 años, de los cuales el 60% se presentó en la década de los 90 y la cuarta parte entre el 2010 y 2011.

Uno de los departamentos de Colombia considerado como zona de mayor riesgo es Santander con su capital Bucaramanga que presenta gran vulnerabilidad debido a que está ubicada

subterráneamente entre las placas tectónicas Sudamericana Caribe y Nasca por lo tanto se genera gran actividad sísmica. Dado lo anterior se ha desarrollado una nueva línea de investigación de operaciones como lo es la logística humanitaria encargada de planificar, implementar y controlar el flujo de recursos destinados ante un desastre natural contribuyendo así a la mitigación y preparación de todas aquellas personas afectadas

Es por esto que el presente proyecto está enfocado en resolver el problema localización-ruteo con periodos de tiempo dinámico (principal contribución de estudio) ya que “La optimización dinámica sirve para calcular cadenas o secuencias óptimas de acciones en el tiempo, es decir, para determinar la magnitud o valor óptimo de las variables que definen el objetivo del problema en cada instante de tiempo dentro de un intervalo dado (período de planificación). La solución de un problema de optimización dinámica proporciona, por tanto, una trayectoria temporal óptima completa para cada variable del problema, mostrando el mejor valor de la variable, hoy, mañana, y así hasta el final del período de planificación” Lorenzo Escot Mangas, Elena Olmeda Fernández y Eva Del Pozo García, 2002), además se tendrá en cuenta una capacidad definida de vehículos y depósitos con el fin de satisfacer la necesidad de recursos de las personas afectadas donde las demandas están representadas por números difusos, puesto que el conocimiento con anterioridad de la localización de un número de depósitos disponibles y rutas óptimas será de gran importancia para una atención pertinente y poder salvaguardar vidas humanas.

El grupo OPALO se destaca por sus aportes a la investigación de operaciones donde actualmente ha desarrollado proyectos para la solución del problema localización-ruteo con diferentes enfoques, pero hasta el momento no se ha realizado un estudio donde se aborde el problema en forma dinámica, de esta manera, se alimentará la base de datos del grupo de investigación.

Este trabajo propone un algoritmo de optimización genético como herramienta práctica hacia la atención de damnificados en un desastre sísmico en la ciudad de Bucaramanga. Este proyecto se basará en el siguiente artículo “Solving the Dynamic capacitated location-routing problem with fuzzy demands by hybrid heuristic algorithm” propuesto por los autores Ali Nadizadeh y Hasan Hosseini Nasab en el cual se encuentran las instancias que se usarán para validar el algoritmo propuesto en esta investigación.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

- Desarrollar un modelo para la solución del problema de localización-ruteo dinámico capacitado con demandas difusas para la atención post-desastre sísmico en la ciudad de Bucaramanga mediante un algoritmo genético.

3.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión literaria sobre modelos usados en la solución de problemas de localización-ruteo dinámico con demandas difusas (DLRP-FD).
- Realizar una revisión bibliográfica sobre la matemática difusa y su aplicación en problemas de optimización.
- Desarrollar un algoritmo genético para la solución del problema de localización-ruteo dinámico con demandas difusas (DLRP-FD).
- Validar el algoritmo desarrollado en Matlab para la solución al problema de (DCLRP-FD) mediante casos de prueba estándar existentes en la literatura.
- Elaborar un artículo académico de carácter publicable basado en los resultados de la investigación.

4. Revisión de la literatura

4.1 Análisis Bibliométrico

De acuerdo con Escorcía (2008), la bibliometría es una parte de la Cienciometría y la Sociología que es la aplicación de métodos matemáticos y estadísticos para analizar tanto el curso de la comunicación escrita o literatura de carácter científico, como a los autores que la producen.

Para realizar un estudio bibliométrico se acude a una búsqueda en profundidad de artículos científicos relacionados con el tema propuesto por el proyecto, se formula la ecuación de búsqueda en la base de datos Web Of Science gracias a la licencia que posee la Universidad Industrial de Santander la cual permite acceder a toda la información necesaria para la investigación. La ecuación de búsqueda utilizada es la que se muestra a continuación:

TS=(((Routing)OR(Location)OR ((Location-routing problem) OR (location routing problem))) AND (fuzzy) AND (fuzzy demand) AND ((dynamic localization problem fuzzy) OR (routing)))

En la búsqueda se encontraron 105 resultados, luego se refinó la búsqueda para los últimos 5 años y se eligieron solo artículos científicos. Se excluyeron las siguientes categorías de la plataforma: sistemas de control de automatización, geociencias multidisciplinaria, recursos hídricos, mecánica, meteorología ciencias atmosféricas, biología molecular de bioquímica, ecología, ingeniería biomédica, ingeniería química, ingeniería mecánica, geografía, investigación de medicina experimental, ya que no se consideró significativa la información de estas categorías para el proyecto, finalmente, se obtienen un total de 90 resultados arrojados donde se hizo una

previa revisión teniendo en cuenta sólo los títulos de los artículos científicos y se optó por utilizar estos resultados para un análisis detallado de la literatura con el software Vantage Point y Bibliometr   de R; los resultados fueron exportados como un archivo “saverdec  ” para su manejo en los software anteriormente nombrados.

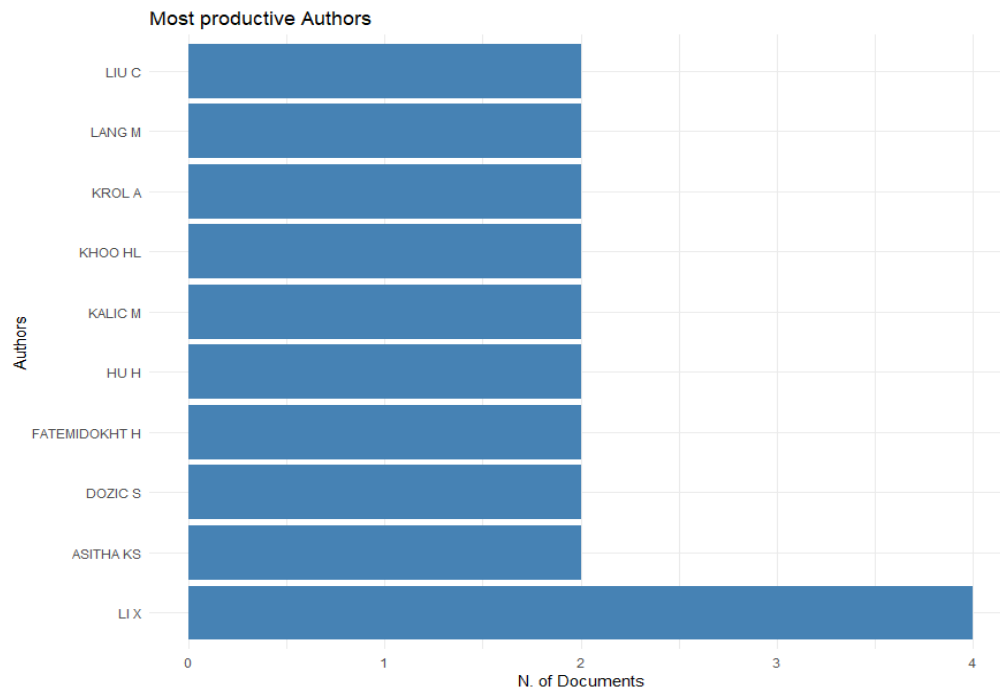


Figura 1. Autores más productivos en los últimos 5 años. Adaptado de R.

De acuerdo con el análisis y los resultados arrojados por el software Bibliometr   de R se encontraron 259 autores diferentes, 10 de los cuales realizan más de una publicación en los últimos años (2014-2018). Un análisis sobre la distribución del número de artículos publicados se muestra en la figura 1. Se observa que el autor Li, Xiang ha publicado 4 artículos en los últimos 5 años siendo el autor más productivo de los encontrados. Además, se podría afirmar que los autores de países del medio oriente participan en mayor proporción en investigación sobre el tema del proyecto con respecto a autores de origen de países europeos y americanos, por consiguiente, se podría decir que lo mencionado anteriormente es válido ya que concuerda con los países más

productivos como se puede observar en la figura 2 que se muestra a continuación:

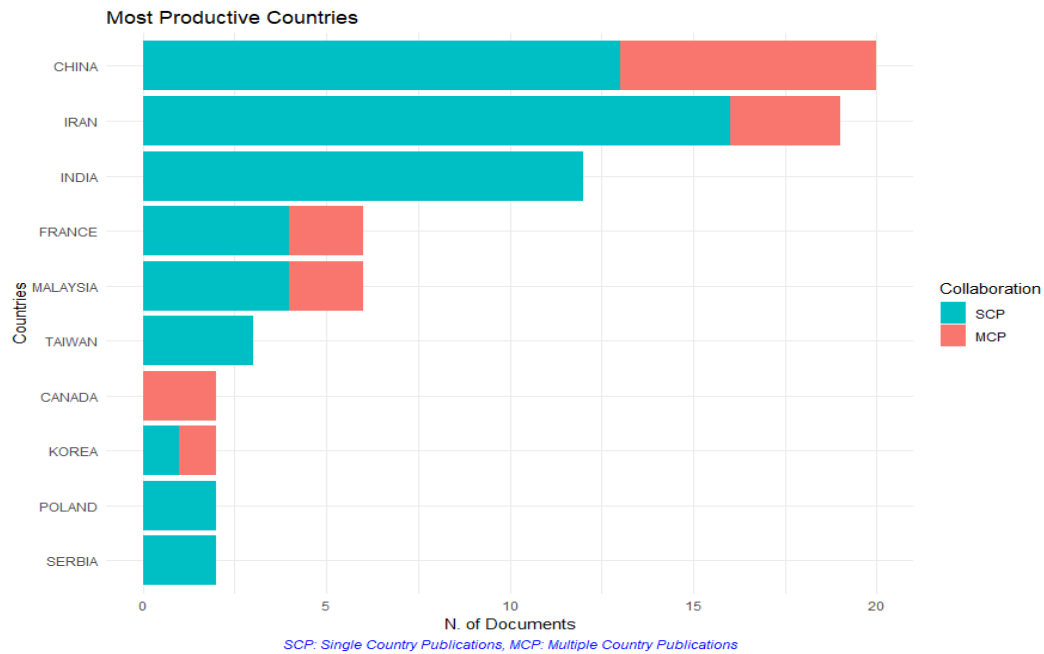


Figura 2. Países más productivos VS número de documentos publicados. Adaptado de R

En la figura 2. Se muestra la relación entre los países más productivos respecto al número de publicaciones que realizaron, China con 20, Irán con 19 e India con 12 artículos publicados en los últimos 5 años. Además, cabe resaltar las publicaciones en conjunto, es decir la colaboración de varios países en publicaciones dado que se presentan en menor proporción a excepción de Canadá puesto que en este país en su totalidad las publicaciones son en conjunto como se observa en la figura 1. Por otra parte, siendo Irán el segundo país con más publicaciones se confirma que este posee mayor interés en el tema de investigación lo cual concuerda con la evaluación del presente trabajo ya que la información es originada por investigadores del país nombrado.

En la figura 3 Se muestra las principales palabras claves y el número de publicaciones presentadas y relacionadas con el tema del proyecto. Algorithm es la palabra clave más destacada ya que según la ecuación de búsqueda se encuentra en 21 publicaciones, además se observa que

genetic algorithm se logra identificar en 9 artículos por tanto es válido afirmar que el algoritmo genético se ha usado en varias publicaciones para la solución de sus problemas lo cual es de interés para la actual investigación; adicionalmente se observan las palabras en conjunto fuzzy demand, fuzzy logic, uncertainty encontradas en 4 artículos, cabe resaltar que Dynamics no está entre las más notorias en el análisis de las 25 palabras puesto que en los últimos años el estudio de localización-ruteo de forma dinámica ha sido investigado en menor proporción.

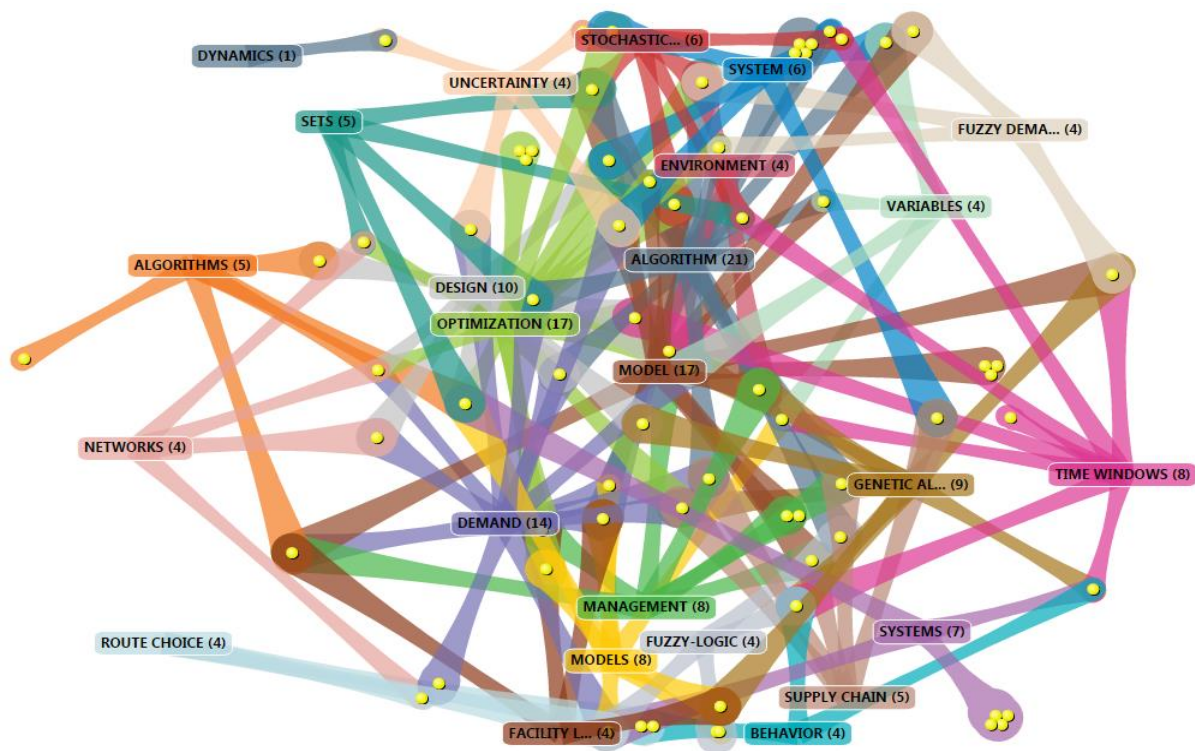


Figura 3. Aduana con palabras claves. Adaptado de Vantage Point (2018).

Dentro del análisis bibliométrico realizado, se resalta la participación del top 10 de revistas que predominan ampliamente en la línea de investigación con más de un artículo publicado. En La figura 4 se logra identificar la revista Applied Soft Computing con mayor contribución dentro del contexto en el tema del proyecto dado que ha realizado 3 publicaciones durante los últimos años, también se evidencia el aporte de las revistas Wirel.Pers. Commun, J. Intell.FuzzY.

Syst, Math. Probl. Eng con 2 artículos publicados cada una, se señala también la participación de Computers & Industrial Engineering con 3 artículos actualmente siendo la revista con más intervenciones sobre el tema en el 2018.

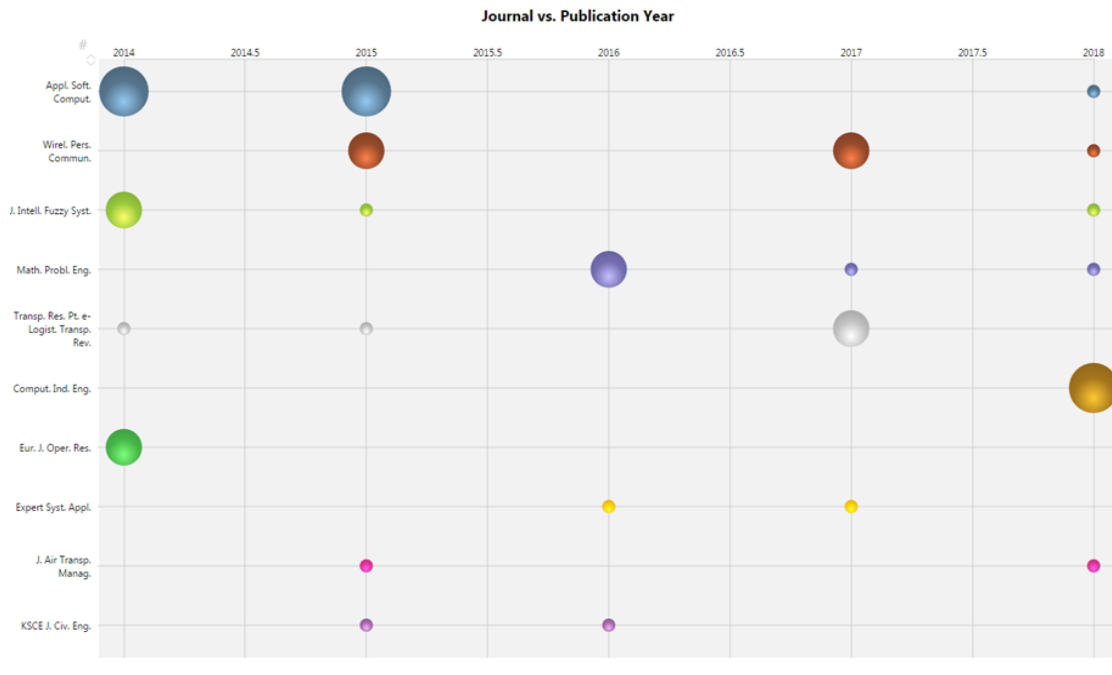


Figura 4. Número de publicaciones anuales por revista. Adaptado de Vantage Point (2018).

En la figura 5, presentada a continuación, se observa que en los últimos años se ha sostenido significativamente el estudio por el tema mencionado, la figura presenta la productividad por año y se logra identificar en el intervalo de 2016-2018 que los autores muestran mayor interés y aportan con profundidad al caso de estudio expuesto y a la ciencia lo que quiere decir que es satisfactorio ya que para la investigación de operaciones es importante contribuir constantemente a la solución de problemas como los expuestos por los autores.

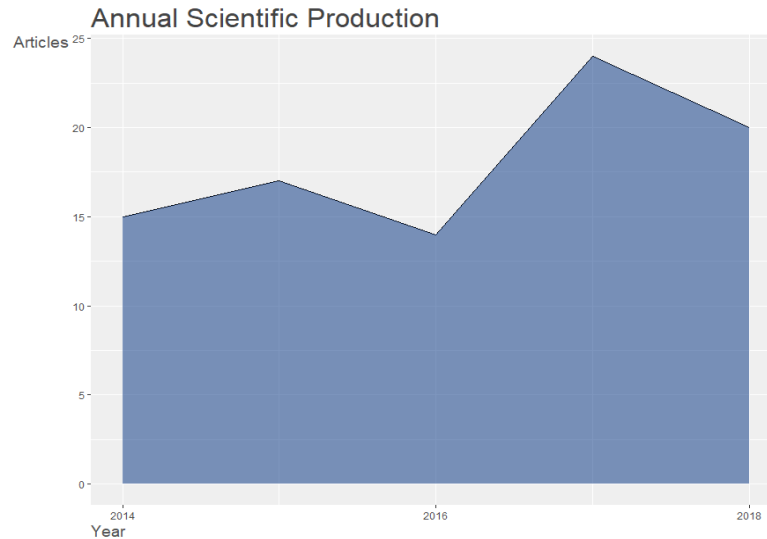


Figura 5. Productividad científica por año. Adaptado de R.

4.2 Análisis preliminar de la literatura

La amenaza constante de los desastres naturales sin duda se ha convertido en la mayor preocupación de los ciudadanos de todo el mundo, puesto que “Los fenómenos climáticos extremos provocan cada vez más víctimas, daños materiales y miles de pérdidas humanas, debido principalmente a los deslizamientos, sismos, los fuertes vientos y las sequías prolongadas. Los desastres climáticos son cada vez más frecuentes”. (Ochoa, 2013).

Por esta razón, se resalta la importancia de reducir la vulnerabilidad de las comunidades afectadas y especialmente establecer estrategias de prevención a corto plazo en casos de emergencia ante un evento repentino natural. En Colombia la actividad tectónica ha tenido manifestaciones severas ya que es un país con alta amenaza sísmica, especialmente Bucaramanga capital del departamento de Santander. Varios de los desastres ocurridos en Sudamérica han ocurrido en Colombia; terremotos, erupciones volcánicas que han causado un número importante de víctimas desde épocas de la colonia (Cardona & Yamín, 2006, pág. 27).

Por consiguiente, las medidas preventivas post-desastre ante las posibles ocurrencias de eventos, deben ser cuidadosamente estudiadas con el fin de mitigar el impacto y poder abastecer las necesidades de las personas afectadas en la etapa de este proceso.

Un tema importante en la investigación de operaciones es el de localización de facilidades de servicio y el ruteo de vehículos. El LRP (por sus siglas en inglés) es un tema que ha entrado en auge durante varios años, “la necesidad de un sistema logístico integral ha llegado a ser un objetivo primario en la gestión de desastres donde se reconoce que hay una fuerte relación entre la ubicación de instalaciones, la asignación de proveedores, vehículos, clientes a las instalaciones y el diseño de rutas alrededor de las instalaciones”. (Hassanzadeh, Mohseninezhad, Tirdad, Dadgostari, & Zolfagharinia, 2009).

Los autores Nagy y Salhi (2007) afirman que los problemas de localización-ruteo están claramente relacionados tanto para el problema localización clásica como para el problema ruteo de vehículos, si todos los clientes están directamente vinculados a un depósito, el LRP se convierte en un problema de localización estándar, si, por el contrario, los lugares de depósito son fijos, el LRP se reduce a un VRP.

Una de las áreas principales del problema de localización y ruteo es el LRP dinámico. Nagy y Salhi (2007) afirman que se pueden distinguir dos tipos de problemas dinámicos, en el primero, los depósitos son localizados secuencialmente; en el segundo, los depósitos son localizados en el comienzo del horizonte de planificación de las rutas de vehículos y varía con las variaciones en la demanda del cliente. El primer caso es más aplicable si la demanda es cada vez mayor y el segundo si la demanda es fluctuante. De modo que esta investigación está enfocada en abordar el problema dinámico tomando en cuenta que los depósitos solo se pueden abrir en el inicio del horizonte de

planificación y permanecen sin cambios a lo largo del horizonte de planificación y el enrutamiento de vehículos se puede cambiar en cada periodo, debido a las fluctuaciones de la demanda, este proyecto pertenece al segundo caso de problema dinámico.

Por lo anterior, en esta revisión preliminar se presentan algunas investigaciones sobre el tema dinámico y estudios que abordan el problema localización-ruteo bajo incertidumbre aplicando la lógica fuzzy y tomando los aportes de los autores como referencias para la ejecución del tema del proyecto.

Los primeros intentos en investigación sobre el LRP dinámico fueron en 1989 por Laporte & Dejax (como se citó en Nadizadeh & Hosseini Nasab, 2014). Tomaron varios periodos de planificación para la LRP, por lo que en cada periodo pueden cambiar entre las posiciones y las rutas. Mostraron una representación ingenua de la red del problema. El problema de optimización de la red resultante se resuelve mediante métodos exactos y heurísticos. Salhi & Nagy (1999) asumieron que los depósitos eran fijados a lo largo del horizonte de planificación, pero las rutas de vehículos eran modificadas luego de asumir cambios en la demanda de los clientes. También suponen que el conjunto de clientes no ha cambiado. Ambrosino & Scutella (2005) analizaron varios casos de estudio en donde también se indaga las versiones dinámicas de los problemas LRP, donde la red de distribución se analiza sobre un cierto horizonte de tiempo en lugar de considerar un período fijo de tiempo. Asimismo, discutieron escenarios estáticos y dinámicos donde se aplica un software comercial para resolver la formulación de programación lineal entera (ILP).

Yi & Ozdamar (2007) presentaron un modelo de localización-ruteo integrado dinámico en la coordinación de apoyo logístico y evacuación de operaciones en respuesta a emergencias y desastres naturales, donde su objetivo era maximizar el nivel de servicio de respuesta al permitir

el acceso rápido a una de las áreas afectadas y la localización de las unidades de emergencias temporales en sitios apropiados. Sugirieron para la solución del problema planteado un procedimiento en dos etapas, la primera etapa consistía en la construcción de la formulación de un modelo compacto que trata a los vehículos como flujos enteros y en la segunda etapa para poder obtener las instrucciones detalladas del vehículo utilizaron un algoritmo de división simple para la generación de rutas de vehículos y de carga/descarga instrucciones de la solución de la etapa 1. Además, ilustraron el enfoque de las dos etapas en un escenario que describe un posible terremoto en Estambul, también consideraron un horizonte de planificación de 8 períodos para todos los problemas. Finalmente, los resultados arrojaron que el modelo propuesto es eficiente y demuestran la capacidad de resolución del modelo con instancias de prueba generadas aleatoriamente.

Los investigadores Shuanglin, ZuJun & Zheng (2014) introdujeron un modelo dinámico multiobjetivo para el problema de localización-ruteo (DMLRP) en caso de un terremoto teniendo en cuenta que las dos actividades más importantes dentro del sistema logístico posterior al terremoto son la evacuación de civiles y la logística de socorro. Su principal objetivo era minimizar el tiempo y el costo total de viaje para cada período, plantearon una meta-heurística que incorpora un algoritmo genético híbrido multi-objetivo para resolver el modelo de programación propuesto, finalmente, el modelo de optimización propuesto y la meta-heurística se demostraron a través de un ejemplo numérico. Los resultados indicaron que la metaheurística propuesta es computacionalmente accesible para resolver el modelo.

Hasta ahora han sido mencionados estudios sobre modelos relacionados con problemas LRP dinámicos en un horizonte de planificación en varios periodos de tiempo según como se abordará cada problema. En el presente trabajo se considera dentro del horizonte de planificación puede existir cierta incertidumbre en parámetros como por ejemplo la demanda de los clientes, dado que

en algunos casos esta información no es suficientemente precisa.

En el transcurso de los años se ha venido estudiando la lógica difusa ya que esta permite tratar información imprecisa y ayuda en la toma razonable de decisiones en un entorno de incertidumbre. En este apartado se nombran algunos artículos que exponen modelos usados en problemas LRP y VRP dinámicos utilizando la lógica difusa, por ejemplo, Wang & Ma Zu (2011) propusieron un modelo de optimización dinámica difusa para el problema LRP con ventanas de tiempo enfocados en el tema de logística emergencia post-terremoto, consideraron las características dinámicas, la oportunidad, la conectividad de las redes de carreteras y la demanda incierta en el sistema. Proponen un algoritmo genético mejorado (GA) basado en la programación dinámica demostrando la validez del modelo y el algoritmo mediante ejemplo numéricos lo cual concluyeron que ambos fueron efectivos y eficientes.

Ghannadpour, Noori , Moghaddam, & Ghoseir (2014) presentaron un modelo para la solución de un problema de ruteo de vehículos dinámico multi-objetivo con ventanas de tiempo difusas (DVRPFTW), en el modelo consideraron la satisfacción de los clientes en el ruteo de vehículos donde esta información fue representada como un número difuso convexo. En el cual, el objetivo del proyecto consistía en minimizar la distancia y el tiempo de espera impuesto a los vehículos y maximizar las preferencias generales de servicio de los clientes. Con respecto al método de solución, los investigadores aplican el algoritmo genético (GA) y tres módulos básicos propuestos en donde verificaron el estado del sistema, incluida la información de vehículos y clientes en un módulo de gestión.

Kuo, Wibowo, & Zulvia (2016) aplicaron un sistema de colonia de hormigas difusas para resolver el problema de ruteo de vehículos dinámico con tiempo de servicio incierto, lo cual,

consistía en considerar la ubicación dinámica del cliente, el tiempo de entrada de los pedidos y por supuesto el tiempo de servicio incierto. El modelo que propusieron radica en dos objetivos: maximizar el número de clientes atendidos y minimizar el tiempo de espera de los clientes. Además, se propuso un algoritmo Fuzzy-ACS con la inserción clúster, los resultados demostraron que el algoritmo de inserción propuesto con éxito da mejor feromona inicial a las hormigas por lo tanto se puede utilizar para problemas del mundo real.

En los artículos nombrados anteriormente se ha observado la aplicabilidad de la lógica difusa en problemas de optimización en los últimos años ya que en sus trabajos consideraron cierta incertidumbre para los datos en lo cual utilizaron la teoría de conjuntos difusos o lógica difusa como herramienta para facilitar el manejo de sistemas complejos, dado que la matemática tradicional no podría dar soluciones óptimas por su exactitud.

Zadeh (1965) introdujo el concepto general de lógica difusa donde presentó una nueva forma de procesar la información permitiendo desarrollar una lógica que no solo contemplaba la opción de verdadero y falso, sino, también consideraba las múltiples respuestas entre ambas y los denominó conjuntos difusos.

La lógica difusa procura crear aproximaciones matemáticas en la resolución de ciertos tipos de problemas. Pretenden producir resultados exactos a partir de datos imprecisos, por lo cual son particularmente útiles en aplicaciones electrónicas o computacionales. El adjetivo “difuso” aplicado a ellas se debe a que los valores de verdad no deterministas utilizados en ellas tienen, por lo general, una connotación de incertidumbre. (Morales Luna, 2002).

Zadeh (1971) publicó en su artículo e intrdujo los elementos formales para teminar de conceptualizar la doctrina de la logica difusa,dice que esta lógica trata de copiar la forma en que

los humanos toman decisiones. Lo que se busca, mediante el empleo de la teoría de los conjuntos difusos es describir y formalizar la realidad, empleando modelos flexibles que interpreten las leyes que rigen el comportamiento humano y las relaciones entre los hombres. Finalizando los años 70, Zadeh (1978) indagó entre los términos vague y fuzzy aclarando que el termino fuzzy se refiere a (impreciso, pero informativo) y vague a algo (ambiguo, no informativo).

Dicho lo anterior, se ha demostrado que desde los años 60 la lógica difusa ha sido estudiada por varios autores ya que la matemática difusa ha permitido modelar diferentes problemas del mundo real incluyendo la predicción de desastres naturales, toma de decisiones en las empresas entre otros, a continuación, se presentarán la descripción de algunos artículos relevantes para esta investigación, problemas de optimización que han sido tratados mediante el uso de la matemática difusa:

Fazel Zarandi, Hemmati, Davari & Turksen (2013) aplicaron un procedimiento integrado de simulación para resolver el problema en el entorno difuso ya que abordaron el problema localizacion-ruteo con ventanas de tiempo (LRPTW por sus siglas en inglés) en condiciones de incertidumbre, tomaron la demanda de los clientes y los tiempos de viajes como variables difusas, utilizaron la teorira de la credibilidad para desarrollar el modelo y como propuesta de solucion plantearon un algoritmo de simulacion embebido utilizando un metdo de barrido y una heuristica basada en fuzzy donde los resultados muestran el rendimiento del algoritmo concluyendo que este proporciona el mejor rendimiento en situaciones de solucion limitada en problemas de localización de intalaciones y sus variantes.

Mehrjerdi & Nadizadeh (2013) estudiaron el problema de localización-ruteo capacitado con demandas difusas enfocándose en la importancia del crecimiento de los costos de la red en las cadenas de suministro de negocios. Para resolver el problema, se propuso un método de agrupación

codicioso con cuatro fases. La distancia adicional debido a los fallos de ruta se estimó mediante la simulación para cada ruta planificada. El objetivo del proyecto fue minimizar los costos fijos de los vehículos, los gastos de viaje y el total de las distancias de viaje. Por último, para indicar que la separación de la fase de localización y la fase de encaminamiento en (CLRP-FD por sus siglas en inglés) conduce a soluciones no óptimas y se propuso un experimento computacional.

Shouying & Huijuan (2014) sugirieron un modelo para el problema de localización-ruteo difusa con ventanas de tiempo para la búsqueda de víctimas en caso de desastres naturales como lo es las inundaciones, tomaron en cuenta la posibilidad de la escases de lanchas de rescate por lo tanto consideraron que las lanchas tendrían que devolverse repetidamente siendo estas una variable difusa. El objetivo fue minimizar el rescate completo es decir la suma de tiempo de todos los nodos de rescate. Desarrollaron un algoritmo genético híbrido que contiene reglas heurísticas y El análisis de prueba simulado demuestra el grado de efectividad del objetivo principal, la función del factor de carga y el factor de carga razonable, e indica que el modelo y el algoritmo proporcionan un método para la Decisión de búsqueda de víctimas en inundación. Finalmente sugirieron en futuras investigaciones abordar el problema en forma dinámica.

Brito, Martínez, Moreno & Verdegay (2015) utilizaron una nueva variante de (VRPTW por sus siglas en inglés) con las rutas de cierre y apertura. Además, tomaron en cuenta las capacidades y las limitaciones imprecisas de las ventanas de tiempo, que se modelan como restricciones difusas. Realizaron un procedimiento metaheurístico híbrido ACO basado en GRASP y VNS para la búsqueda de soluciones óptimas de este tipo de problemas. Los experimentos realizados demostraron que el procedimiento es eficaz para encontrar una buena solución en corto tiempo de ejecución.

5. Marco Teórico

5.1 Logística humanitaria

Ante un desastre se entiende logística humanitaria como estrategia vital para la coordinación, administración, movilización de fondos y activos de recursos para la ayuda de personas damnificadas.

Cuando un desastre mayor golpea a un país, si los servicios locales de emergencia se sienten abrumados por las consecuencias, se solicita ayuda al resto del mundo. Entonces, las organizaciones de ayuda responden entregando ayuda básica (alimentos, suministros médicos, refugio) a los necesitados. Operaciones de socorro principalmente relacionados con la adquisición, entrega de recursos y el almacenamiento de suministros a personas en el área afectada, se lanzan, y la logística humanitaria se convierte en un factor crítico para el éxito en la preparación y gestión de estas operaciones. (Victoriano, Ortuño, Tirado, & Montero, 2011).

Se puede reconocer que la logística humanitaria, así como los negocios de logística, abarca una gama de actividades que incluyen preparación, planificación, adquisición, transporte, almacenamiento, seguimiento y localización y despacho de aduanas. Por lo tanto, puede ser que los principios básicos de gestión de los flujos de bienes, información y finanzas presentes en el campo de los negocios también siguen siendo válidos para la logística humanitaria. La diferencia fundamental está en la motivación para mejorar el proceso logístico, es decir, en el caso de logística humanitaria se requiere ir más allá de la rentabilidad. (Kovács & Spens, 2007).

5.2 Desastres

El desastre es, como lo define el Centro de Investigación sobre Epidemiología de

Desastres (CRED), "una situación o evento que sobrepasa la capacidad local, que requiere una solicitud a nivel nacional o internacional de asistencia externa; un imprevisto y a menudo un evento repentino que causa un gran daño, destrucción y sufrimiento humano.

Los desastres pueden ser ocasionados por la naturaleza o por la fuerza de la actividad del hombre teniendo como consecuencia pérdidas humanas y afectación socioeconómica en la población, es por esto que existen organizaciones creadas con el objetivo principal de estar preparadas para los desastres naturales. Estos grupos trabajan en labores de rescate a escala global y local.

5.3 Lógica Fuzzy

La definición del término Difusa hace referencia a confusión, vaguedad, borroso o poco preciso, la lógica difusa es una teoría formal, bien fundamentada que propone una visión matemática más cercana a la realidad humana, en donde se reconoce valores desiguales e intermedios.

La lógica fuzzy (fuzzy logic) trata de acercar la matemática al lenguaje impreciso del hombre común. El ser humano se maneja habitualmente con conceptos vagos, los cuales no se pueden representar con la matemática tradicional. (I.T. Informática de Sistemas, 2004). La Lógica fuzzy es una lógica de múltiples valores, que permite que sean definidos los valores intermedios entre las evaluaciones convencionales como: verdadero o falso, sí / no, alto / bajo, etc. Nociones como más alto o muy rápido pueden ser formuladas matemáticamente y procesadas por computadoras, a fin de aplicar una forma de "pensamiento humano" a la programación de computadores. A

diferencia de la lógica clásica, modela los modos imprecisos de razonamiento, que juegan un papel esencial en la habilidad humana para tomar decisiones razonables en un entorno de incertidumbre.

5.3.1 Conjuntos Fuzzy. Un conjunto fuzzy se caracteriza por una función de pertenencia $\mu(x)$ que puede tomar cualquier valor en el intervalo cerrado $[0,1]$, es decir, valores comprendidos entre 0 y 1. (Martelo Gómez, 2011).

Para los conjuntos fuzzy la función característica es conocida como la función de membresía, representa la magnitud de participación de cada elemento. Asocia un peso con cada una de los elementos que son analizados, define un acoplamiento funcional entre estos y determina un valor de salida. Las funciones de membresía usan el elemento de entrada como factor del peso para determinar su influencia en el conjunto difuso de salida. Por lo tanto, se puede concluir que los conjuntos fuzzy son aquellos que tiene un peso de pertenencia en el intervalo de 1 a 0. La función característica de un conjunto fuzzy se representa en la figura 6.

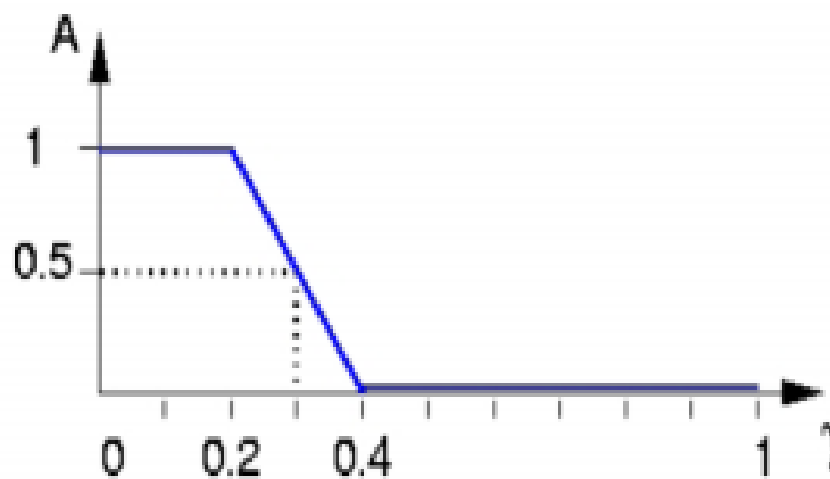


Figura 6. Función característica de un conjunto fuzzy. Adaptado de Zarandi et al. (2013).

5.3.2 Función de Membresía. La pertenencia o membresía es una relación que vincula a cada elemento con un conjunto. En otras palabras, en un conjunto bien definido (lógica clásica), la pertenencia o no pertenencia de un elemento x a un conjunto A se describe mediante la función característica $\mu_A(x)$ donde: usar modo de ecuaciones, doy ejemplo:

$$\mu = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}$$

La función de pertenencia asociada a los conjuntos concretos sólo puede tener dos valores: 1 o 0; mientras en los conjuntos difusos puede tener cualquier valor entre 0 y 1. Un elemento puede pertenecer (parcialmente) a un conjunto difuso y simultáneamente pertenecer (parcialmente) al complemento de ese conjunto. (Duarte, 1999).

5.3.3 Variable lingüística. Es un esquema lingüístico que, en sí, tiene un significado poco informativo, pero que es susceptible de ser rellenado por término que si lo tiene.

5.4 Algoritmo Genético

Los algoritmos genéticos fueron propuestos por John Holland en la década de 1960. En esta evolución del algoritmo, la mejora de soluciones candidatas que pertenece a una población de tamaño especificado tiene como objetivo con la ayuda de operadores específicos que tienden a imitar la selección natural y la herencia genética a través de generaciones (Mitchell , 1999).

El algoritmo genético está basado en el proceso genético de los seres vivos y representan una familia de algoritmos que utilizan algunos de los principios genéticos que están presentes en la naturaleza, a fin de resolver problemas computacionales particulares. Estos principios naturales son: herencia, cruce, mutación, supervivencia del más apto, migraciones, etc. Los Algoritmos Genéticos son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real. (Bogdanović,

2011).

El flujo del algoritmo genético simple se puede resumir en los siguientes siete pasos principales:

Paso 1 (inicialización): Generar una población inicial de cromosomas STAND-ing para posibles soluciones a un problema.

Paso-2 (evaluación): Evaluar las cualidades de los cromosomas en la población de acuerdo a sus valores de fitness.

Paso 3 (selección): seleccionar un par / pares de cromosomas de padres para el apareamiento.

Paso 4 (sexual reproducción-exploración): Aplicar de cruce a los cromosomas de padres seleccionados para generar nuevos cromosomas descendencia.

Paso 5 (asexual reproducción de explotación): Mutar nuevas crías cromosomas.

Paso 6 (sustitución): Reemplazar cromosomas descendencia con los actuales cromosomas más débiles de la generación.

Paso 7 (criterio de parada): Cuando uno de los criterios de parada predefinido es satisfecho, terminar el algoritmo. De lo contrario, vaya al paso-2 con la nueva generación.

5.4.1 Construcción del Algoritmo Genético. La tasa de éxito del algoritmo se basa en algunas etapas de construcción principales que deben ser manejados adecuadamente. A continuación se describen las etapas: - codificación cromosoma, los métodos para generar una población inicial, determinación de la función de aptitud, definición del proceso evolutivo que incluye diferentes tipos de operadores genéticos, técnicas de selección de los padres, las estrategias de sustitución,

determinación de los parámetros característicos tales como tamaño de la población, cruzada sobre la tasa, tasa de mutación, el número de padres para la reproducción, el número de sustituciones en cada generación y los métodos para hacer frente a la inviabilidad. (Hakan & Sercan, 2015).

5.4.1.1 Cromosoma. Cuando el servicio de las limitaciones de capacidad de las instalaciones necesita ser tomadas en cuenta por el tipo del modelo, utilizando dos tipos de variables de decisión que se destacan por su servicio y ubicación, respectivamente, se hace inevitable. Las variables de decisión x_{ij} relacionados con el servicio a cualquier punto de la demanda desde cualquier sitio de la ubicación son binarios ¿Qué significa?, mientras que otras variables de decisión “j” en relación con el número de instalaciones para ubicar en cualquier potencial sitio de ubicación son números enteros. Por lo tanto, mientras que la codificación del cromosoma para ejecutar el algoritmo genético y resolver un modelo capacitado, dos tipos de dominios necesitan ser utilizado en la estructura del cromosoma. Este tipo de estructura, que aparece con poca frecuencia en la literatura, por desgracia hace que la solución más difícil requiera la adaptación de los operadores genéticos para que la estructura no perturbe los distintos segmentos del cromosoma. La estructura de los cromosomas se ilustra en la Figura 7 La codificación de un cromosoma.

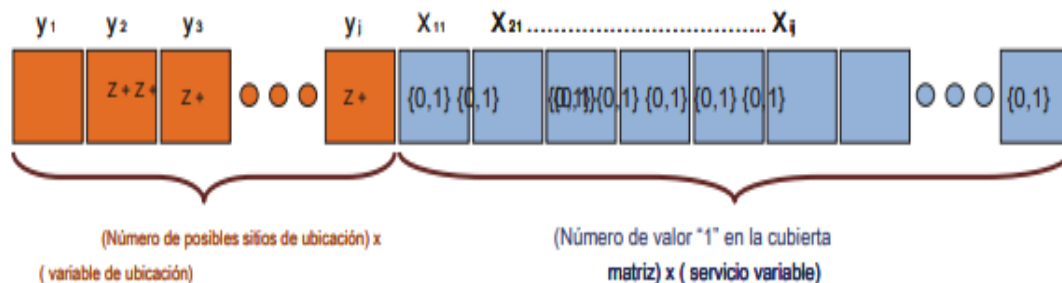


Figura 7. La codificación de un cromosoma. Adaptado de Zarandi et al. (2013).

El número de variables de servicio es igual a “1” en la matriz de recubrimiento. La matriz cubierta consiste en valores “0” y “1”, que muestra si una instalación situada en el sitio j es capaz de dar servicio a un punto i o no la demanda. La estructura de cromosoma está construida de acuerdo con la cubierta de la matriz como se representa en la Figura 8. El cromosoma de construcción.

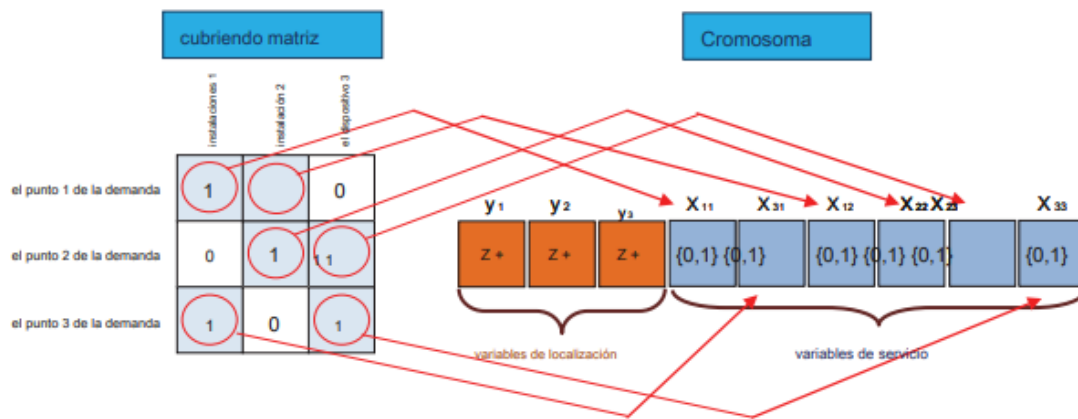


Figura 8. El Cromosoma de construcción. Adaptado de Zarandi et al. (2013).

Como “1” en los aumentos de la matriz que cubren, la longitud del cromosoma también se hace más largo. Esto hace que el problema más difícil y también aumenta el tiempo transcurrido para la obtención de una solución cualificado.

5.4.1.2 Manejo con inviabilidad. En realidad, en muchos casos, muchos cromosomas posibles no codifican para las soluciones viables durante el uso de algoritmos genéticos para resolver un problema de cobertura. Como resultado de la recombinación de los individuos o mutación de los individuos, una no factible descendencia podría salir por la falta de mecanismo de control de comprobación de factibilidad de la descendencia. Por lo tanto, se pueden proponer tres técnicas diferentes para manejar los individuos no factibles. La técnica más simple es rechazar los individuos no factibles hasta que se genera un ejecutable. Otra forma es penalizar individuos no factibles en la función de aptitud, que es más apropiado o incluso inevitable en algunos casos. El

último método es la reparación de una solución factible con una metodología desarrollada (Blum & Roli, 2003)

5.4.1.3 Generación población inicial. La decisión sobre el tamaño de la población y el método que se ha beneficiado de la creación de los cromosomas de la población inicial, que son posibles soluciones de candidatos a los problemas que se han tenido en cuenta antes de ejecutar el algoritmo. Ahora, el aumento del número de la población inicial hace que el tiempo de cálculo del algoritmo se puede extenderse hasta un nivel inaceptable, mientras que la disminución causa de la variedad de los cromosomas a reducir, puede conducir el algoritmo que se adhieren a un óptimo local.

A menor variedad cromosómica que existe en la población inicial, se espera una menor probabilidad de alcanzar el óptimo global. La insuficiencia cromosómica inadecuada también puede dar como resultado una convergencia prematura (Diaz Gomez & Hougen, 2007)

5.4.1.4 Selección. Dado que la presión de selección y la diversidad en la población se pueden ajustar cambiando el número de individuos que participan en una competencia de torneo. Para ser seleccionado, se ha utilizado la estrategia de selección de torneos. En esta estrategia los individuos más aptos prevalecen sobre el resto al final de las competiciones del torneo. La competición del torneo se repite hasta que el número de ganadores alcanza el número deseado de los padres. La presión de selección se mantiene por la diferencia de los valores de fitness entre los competidores del torneo. Esta estrategia se considera como más eficiente y sobre todo como más capaz de obtener el óptimo global (Sivanandam & Deepa, 2008)

5.4.1.5 Cruce. El operador de cruce imita más o menos la recombinación biológica entre dos cromosomas individuales. Este operador es considerado como el operador primario que proporciona en primer lugar la descomposición de dos formaciones cromosómicas parentales distintas en un locus elegido al azar y, a continuación se recombina sus segmentos para formar dos descendientes más prometedores (Beasley & Chu, 1996). Sin embargo, también existe la posibilidad de que los dos padres son copiados sin ninguna interrupción en la descendencia. Este operador es conocido como un explorador debido a su capacidad de desplazar a una región prometedora en el espacio de búsqueda (que posiblemente puede conducir solución a un valor óptimo) (Mitchell , 1999)

5.4.1.6 Mutación. Este operador al azar y asexualmente alterna los valores de los alelos de algunos genes en un cromosoma. La posibilidad de ocurrencia mutación en cada locus de la formación se da sobre todo como muy baja. La probabilidad de la mutación que afecta directamente a la frecuencia de la explotación tiene que ser ajustado meticulosamente a un nivel adecuado con el fin de evitar que el algoritmo se atasque en un óptimo local o fluctué de manera inconsistente. Es decir, a pesar de ser aceptado como un operador secundario en el algoritmo genético, la mutación encarna la capacidad de mantener la solución sin el estancamiento del algoritmo en el óptimo local. Este operador también se conoce como la explotación, debido a su pequeña propiedad en la diversificación de la solución actual en el fin de golpear la óptima.

5.4.1.7 Sustitución. Además de los operadores y la estrategia de selección, la estrategia de sustitución también es muy importante para la convergencia y la eficiencia del algoritmo.

El reemplazo es la etapa del algoritmo en la que se intercambiarán los individuos de la generación anterior con el descendiente recién generado o permanecerán en la población y el

número de estas personas que salen (brecha generación) se deciden. El individuo a dejar la población se puede seleccionar como el individuo menos ajuste de la totalidad o como el individuo más antiguo de todos o uno de los individuos que están por debajo de la media (Sivanandam & Deepa, 2008)

5.4.1.8 Fin al algoritmo. El algoritmo se puede terminar de acuerdo con la calidad satisfactoria de la solución en un tiempo razonable.

5.5 Teoría de la credibilidad

El concepto de conjunto difuso fue introducido por (Zadeh L, 1965) a través de una función de membresía para medir la posibilidad de que ocurra un evento difuso, Zadeh propuso la posibilidad medida y medida de necesidad, respectivamente. Se ha demostrado que tanto la medida de posibilidad y necesidad medida satisfacen las propiedades de normalidad, no negatividad, monotonicidad y semicontinuidad. Liu (2006) definió la medida de credibilidad como el valor medio de la medida de posibilidad y medida de necesidad, que fue redefinida por (Liu & Li, 2006) como una función de conjunto que satisface la normalidad, la Monotonicidad, la auto-dualidad y los axiomas de maximalidad parcial. Se presentan algunas definiciones respecto a la teoría de la credibilidad.

Sea Ω un conjunto no vacío, P sea el conjunto potencia o de partes de Ω (conjunto de todos los subconjuntos de Ω), y Cr una medida de credibilidad. El triplete (Ω, P, Cr) se llama un espacio de credibilidad (Liu, 2002; Zarandi et al., 2013).

Una variable difusa se puede definir como una función del espacio de credibilidad (Ω, P, Cr) al conjunto de números reales (Liu, 2002; Zarandi et al., 2013).

Sea E una variable difusa en el espacio de credibilidad (Ω, P, Cr) . Entonces su función de pertenencia se deriva de la medida de credibilidad Cr por: $\mu(X) = (2Cr\{E = x\}) \wedge 1, x \in R$. Donde $\wedge$ es el operador mínimo (Liu, 2002; Zarandi et al., 2013).

Sea $\square$ una variable difusa en un espacio de posibilidad (Ω, P, Cr) . Entonces el conjunto $\mathcal{E}\alpha = \{E(\theta) | \theta \in H, Pos\{\theta\} \geq \alpha\}$ es llamado el conjunto α -nivel de E (Zheng & Liu, 2006) (Zarandi, Hemmati, Davari, & Turksen, 2013)

Las medidas de posibilidad, necesidad y credibilidad pueden ser utilizadas para comprar cantidades difusas. La posibilidad mide la mejor situación mientras la necesidad mide la peor situación, es decir, la posibilidad representa el optimismo hacia la ocurrencia de los eventos difusos y la necesidad presenta el pesimismo (Brito, 2013). Por último, la credibilidad de un evento difuso se define como el promedio de su posibilidad y necesidad.

Sea (Ω, P, Pos) un espacio de posibilidad, y A sea un conjunto en $P(\Omega)$. Entonces, la medida de credibilidad de A es definida por $Cr\{A\} = \frac{1}{2} (Pos\{A\} + Nec\{A\})$. Si la función de pertenencia de E se da como μ (u es un evento) (Zheng & Liu, 2006; Zarandi et al., 2013). Entonces la posibilidad, la necesidad y la credibilidad del evento borroso $\{E \geq r\}$ pueden ser representadas por:

$$Pos\{E \geq r\} = \sup_{u \geq r} \mu(u) \quad (1)$$

$$Nec\{E \geq r\} = 1 - \sup_{u < r} \mu(u) \quad (2)$$

$$Cr\{E \geq r\} = \frac{1}{2} (Pos\{E \geq r\} + Nec\{E \geq r\}) \quad (3)$$

Un evento difuso puede fracasar, aunque su posibilidad sea 1, y permanecer, aunque su necesidad sea 0. Sin embargo, un evento difuso debe permanecer si su credibilidad es 1, y fracasar si su credibilidad es 0. Ahora se presenta un ejemplo de la posibilidad, necesidad y credibilidad

del evento difuso $\{E \geq r\}$ considerando una variable triangular difusa $E = (r_1, r_2, r_3)$ presentada en la figura 9 (Zarandi et al., 2013).

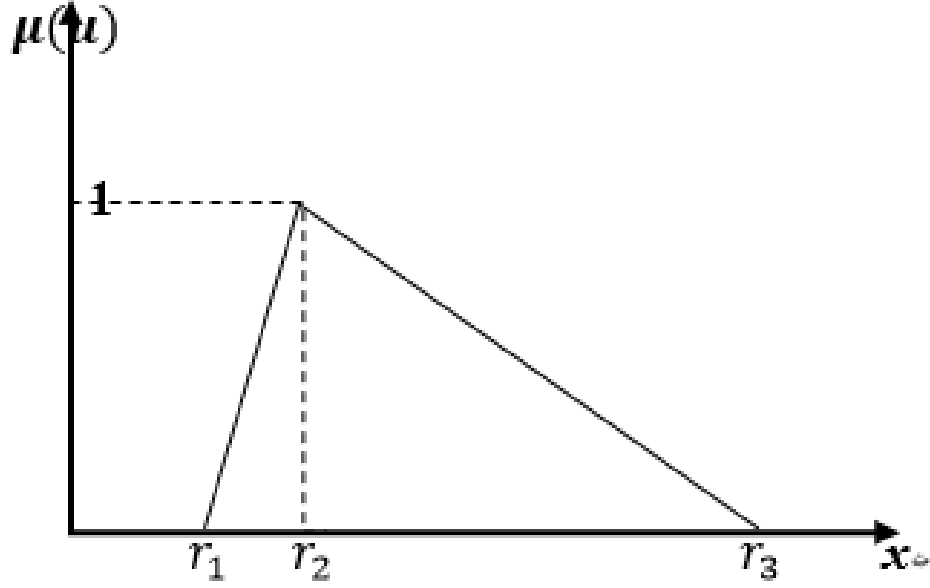


Figura 9. Una variable triangular difusa. Adaptado de Zarandi et al. (2013).

$$Pos\{E \geq r\} = \begin{cases} 1 & \text{si } r \leq r_2 \\ \frac{r_3 - r}{r_3 - r_2} & \text{si } r_2 \leq r \leq r_3 \\ 0 & \text{si } r \geq r_3 \end{cases} \quad (4)$$

$$Nec\{E \geq r\} = \begin{cases} 1 & \text{si } r \leq r_1 \\ \frac{r_2 - r}{r_2 - r_1} & \text{si } r_1 \leq r \leq r_2 \\ 0 & \text{si } r \geq r_2 \end{cases} \quad (5)$$

$$Cr\{E \geq r\} = \begin{cases} 1 & \text{si } r \leq r_1 \\ \frac{2r_2 - r_1 - r}{2(r_2 - r_1)} & \text{si } r_2 \leq r \leq r_3 \\ \frac{r_3 - r}{2(r_3 - r_2)} & \text{si } r_2 \leq r \leq r_3 \\ 0 & \text{si } r \geq r_3 \end{cases} \quad (6)$$

6. Problema DCLRP-FD

6.1 Descripción del problema

El LRP involucra tanto decisiones de localización de las instalaciones como el ruteo de vehículos ya que el número y la ubicación de instalaciones, así como la definición de las rutas para atención de víctimas y suministro representan aspectos importantes en la atención de desastres. Además, dentro del campo del LRP existen horizontes de tiempo en donde la localización y ruteo podría disminuir costos en un horizonte de planificación largo. La presente investigación trata el problema DCLRP-FD en donde se considera un alto grado de incertidumbre ya que no se conoce la demanda de los clientes hasta que el vehículo llegue al cliente. Por lo anterior en la literatura se recomienda utilizar la lógica difusa usando la teoría de la credibilidad, para abordar de mejor manera el problema DCLRP-FD.

La lógica difusa pretende producir resultados exactos a partir de datos bajo incertidumbre, es decir datos imprecisos, en donde una variable difusa puede estar dentro del espacio de la credibilidad como se menciona en la literatura. En este trabajo se propone usar la teoría de la credibilidad y además se utiliza un modelo de programación con restricciones expuestas por (Ali Nadizadeh & Hasan, 2014), así mismo se propone un algoritmo genético como solución al problema planteado.

6.2 La credibilidad y el índice de preferencia

En el presente trabajo, las demandas de los clientes en cada periodo de tiempo no se conocen, es decir, es incierta. Por lo tanto, debido a la incertidumbre presentada en el DCLRP-FD se debe

tomar la decisión en la construcción de las rutas de enviar un vehículo para suministrar la demanda de cada cliente de la secuencia o regresar al depósito y enviar otro vehículo disponible para servir la demanda del nuevo cliente, pues la demanda real de cada cliente solo se conoce cuando el vehículo llega a estos.

En vista de lo mencionado anteriormente, se aplica la teoría de credibilidad, la cual ha sido estudiada y utilizada ampliamente en investigaciones según la literatura para este tipo de problemas difusos. El valor de la credibilidad se expresa como $Cr \in [0,1]$ y es designado como índice de preferencia entendiéndose como la magnitud de preferencia en el envío del vehículo al próximo cliente después de haber servido a un cliente. Cuando $Cr=0$ el conductor está totalmente seguro de regresar al depósito, por otra parte, cuando $Cr=1$, el conductor está totalmente seguro de poder servir al siguiente cliente de la secuencia según la capacidad restante del vehículo. Del mismo modo, se usa este método para los depósitos respecto a la credibilidad.

Primera situación: para tomar la decisión de enviar el vehículo al siguiente cliente o devolverlo al depósito teniendo en cuenta la credibilidad de que la próxima demanda del cliente no supere la capacidad restante del vehículo se define un umbral que esté por encima del cual se prefiere enviar un nuevo vehículo. El umbral es el índice de preferencia del despachador designado como DPI donde $DPI \in [0, 1]$. Por lo tanto, si se cumple la relación $Cr \geq DPI$, entonces el vehículo debe ser enviado al siguiente cliente; de lo contrario el vehículo debe ser devuelto al depósito para cargar de nuevo mercancía y visitar al cliente que no pudo servir. El proceso debe seguir hasta cumplir con la demanda de todos los clientes.

Segunda situación: para tomar la decisión de que la próxima demanda del cliente no supere la capacidad restante del depósito y asignarlo al depósito actual o decidir si el siguiente depósito

abierto debe aceptarlo, entonces para este caso el valor de la credibilidad, es decir el índice de preferencia Cr se denota de la misma manera que para los vehículos, donde $Cr \in [0,1]$. Cuando $Cr=0$, el administrador del depósito está seguro de que no puede aceptar el próximo cliente para dar el servicio. Por otra parte, cuando $Cr=1$, el administrador del depósito está seguro de que puede servir al siguiente cliente de la secuencia.

Cabe mencionar entonces que, si la capacidad restante del depósito para poder atender a los clientes es alta y la demanda en el próximo cliente es baja, entonces la posibilidad del depósito de poder servir al siguiente se hace mayor. Esto significa que cuanto mayor sea la diferencia entre la capacidad disponible del depósito y la demanda en el próximo cliente, mayor será la preferencia para asignar el Próximo cliente al depósito y recibir el servicio.

De igual forma se define un umbral de índice de preferencia de asignación del cliente a un depósito, denotado como API en donde, $API \in [0, 1]$. De manera que, si la relación $Cr \geq API$ se satisface, el depósito debe servir al próximo cliente, en caso contrario el cliente debe recibir el servicio de otro depósito abierto. Este procedimiento no termina hasta que todos los clientes estén asignados.

6.2.1 Fallo de ruta. Debido a la incertidumbre presentada en la demanda de los clientes, un vehículo puede no servir a un cliente una vez que llegue allí debido a una insuficiencia en la capacidad cuando implementa la ruta planificada. Por lo tanto, el vehículo debe volver al depósito y luego volver al cliente donde tuvo un “fracaso”, posteriormente continua su servicio a lo largo del resto de la ruta prevista y su máxima distancia de viaje se penaliza debido a la distancia adicional consecuencia del fallo de ruta que experimentó. (Erbao & Mingyong,2009).

Por consiguiente, en el problema DCLRP-FD se tiene en cuenta un costo adicional dado a un fallo de ruta que se produce en algunos clientes al evaluar la ruta planificada. Cabe mencionar, ambos parámetros DPI Y API son determinados empíricamente y tienen un gran impacto tanto en la longitud total de las rutas planificadas como en la distancia adicional. Aunque los valores más bajos que puede tomar el parámetro DPI indican un mejor aprovechamiento de la capacidad del vehículo y los resultados de estos valores muestran menores distancias planificadas; sin embargo, esto implica un aumento en el número de situaciones en las que un vehículo puede visitar a un cliente, pero no puede servirlo debido a un fallo en la capacidad, lo que aumenta la distancia total que se recorre. En este trabajo, se hace uso de simulación estocástica para evaluar la distancia adicional por fallos de ruta.

Por otro lado, los valores más altos del parámetro DPI se caracterizan por un menor aprovechamiento de la capacidad del vehículo y una distancia adicional inferior para cubrir los respectivos fallos, además, se requiere un mayor número de vehículos, lo cual puede ser causa de la falta de disponibilidad de estos; esto se refleja en un aumento del costo por oportunidades perdidas.

Además, es importante mencionar que el problema consiste en hallar el valor apropiado para este índice de preferencia del despachador para la construcción de las rutas, donde los resultados que se obtienen de los parámetros DPI y API influyen significativamente en la suma de las longitudes para las rutas planificadas, distancias adicionales y costo por oportunidades perdidas.

7. Formulación del modelo matemático

Para solucionar el problema DCLRP-FD se utiliza una programación difusa y limitada por procesos estocásticos fundamentada en la teoría de la credibilidad en un entorno dinámico como fue propuesto por los autores (Ali Nadizadeh & Hasan Hosseini Nasab, 2014) en su modelo, donde se asume lo siguiente:

7.1 Supuestos

- ✓ Las variables de los clientes son variables difusas.
- ✓ Los depósitos sólo se pueden abrir en el inicio del horizonte de planificación y permanecen sin cambios a lo largo del horizonte de planificación.
- ✓ El enrutamiento de vehículos se puede cambiar en cada período, debido a las fluctuaciones de la demanda.
- ✓ Los vehículos y los depósitos tienen una capacidad limitada para servir a los clientes que sus demandas de cambio en cada período de tiempo.
- ✓ Las demandas de los clientes en cada período de tiempo no se conocen.
- ✓ En cada período de tiempo, la demanda de cada cliente debe ser suministrada por un solo vehículo, mientras que la carga total de cada ruta no debe exceder la capacidad del vehículo.
- ✓ Las rutas comienzan y terminan en el mismo almacén y la carga total de todos los clientes asignados a un depósito debe ser menor o igual a la capacidad de ese depósito.
- ✓ Los vehículos que son heterogéneos y tienen la distancia de recorrido máximo solo pueden tomar un recorrido en cada período de tiempo.

- ✓ Cada vehículo tiene un nivel de disponibilidad que varía dentro de $[0,1]$ en cada período de tiempo.
- ✓ La demanda de los clientes en cada periodo es un número difuso triangular tal como:

$$d_j^t = (d_{1j}^t, d_{2j}^t, d_{3j}^t)$$

- ✓ El número difuso que representa la demanda en el cliente jth de el tth periodo se denota por:

$$d_j^t = (d_{1j}^t, d_{2j}^t, d_{3j}^t)$$

- ✓ Cada vehículo tiene una capacidad limitada que se denota por Q_k .
- ✓ Después de servir la primera c (clientes) en el periodo t , la capacidad disponible del vehículo es igual:

$$Q_{kk} = Q_k - \sum_{j=1}^c d_j^t$$

Q_{kk} es también un número borroso triangular, usando las reglas de aritmética difusa, y la credibilidad de que la próxima demanda del cliente no exceda la capacidad restante del vehículo esta se puede obtener de la siguiente manera

$$Q_{kk} = \left(Q_k - \sum_{j=1}^c d_{3j}^t, Q_k - \sum_{j=1}^c d_{2j}^t, Q_k - \sum_{j=1}^c d_{1j}^t \right) = (q_{1,kk}^t, q_{2,kk}^t, q_{3,kk}^t)$$

$$\begin{aligned} Cr &= Cr\{d_{c+1}^t \leq Q_{kk}\} \\ &= Cr\{(d_{1,c+1}^t - q_{3,kk}^t, d_{2,c+1}^t - q_{2,kk}^t, d_{3,c+1}^t - q_{1,kk}^t) \leq 0\} \quad (7) \end{aligned}$$

$$cr\{d_{c+1}^t \leq Q_{kk}\} = \begin{cases} 0, & si \ d_{1,c+1}^t \geq q_{3,kk}^t \\ \frac{q_{3,kk}^t - d_{1,c+1}^t}{2 \times (q_{3,kk}^t - d_{1,c+1}^t + d_{2,c+1}^t - q_{2,kk}^t)}, & si \ d_{1,c+1}^t \leq q_{3,kk}^t, d_{2,c+1}^t \geq q_{2,kk}^t \\ \frac{d_{3,c+1}^t - q_{1,kk}^t - 2 \times (d_{2,c+1}^t - q_{2,kk}^t)}{2 \times (q_{2,kk}^t - d_{2,c+1}^t + d_{3,c+1}^t + q_{1,kk}^t)}, & si \ d_{2,c+1}^t \leq q_{2,kk}^t, d_{3,c+1}^t \geq q_{1,kk}^t \\ 1, & si \ d_{3,c+1}^t \leq q_{1,kk}^t \end{cases} \quad (8)$$

- ✓ Igualmente la capacidad de un depósito está dada por $P_{ii} = P_i - \sum_{j=1}^c d_j^t$ en donde P_{ii} también es un número triangular y donde la credibilidad de que la próxima demanda de clientes asignada no exceda la capacidad del depósito se puede ver como:

$$P_{ii} = \left(P_i - \sum_{j=1}^c d_{3,j}^t, P_i - \sum_{j=1}^c d_{2,j}^t, P_i - \sum_{j=1}^c d_{1,j}^t \right) = (p_{1,ii}^t, p_{2,ii}^t, p_{3,ii}^t)$$

$$Cr = Cr\{d_{c+1}^t \leq P_{ii}\}$$

$$= Cr\{(d_{1,c+1}^t - p_{3,ii}^t, d_{2,c+1}^t - p_{2,ii}^t, d_{3,c+1}^t - p_{1,ii}^t) \leq 0\} \quad (9)$$

$$cr\{d_{c+1}^t \leq P_{ii}\} = \begin{cases} 0, & si \ d_{1,c+1}^t \geq p_{3,ii}^t \\ \frac{p_{3,ii}^t - d_{1,c+1}^t}{2 \times (p_{3,ii}^t - d_{1,c+1}^t + d_{2,c+1}^t - p_{2,ii}^t)}, & si \ d_{1,c+1}^t \leq p_{3,ii}^t, d_{2,c+1}^t \geq p_{2,ii}^t \\ \frac{d_{3,c+1}^t - q_{1,ii}^t - 2 \times (d_{2,c+1}^t - p_{2,ii}^t)}{2 \times (p_{2,ii}^t - d_{2,c+1}^t + d_{3,c+1}^t + p_{1,ii}^t)}, & si \ d_{2,c+1}^t \leq p_{2,ii}^t, d_{3,c+1}^t \geq p_{1,ii}^t \\ 1, & si \ d_{3,c+1}^t \leq p_{1,ii}^t \end{cases} \quad (10)$$

7.2 Conjuntos y parámetros

- ✓ En el modelo matemático se utilizan los siguientes conjuntos y parámetros
- ✓ I: Conjunto de depósitos candidatos indexados por i e $I = \{1, 2, \dots, M\}$, M es el número de depósitos.
- ✓ J: conjunto de clientes indexados por j y $J = \{1, 2, \dots, N\}$, N es el número de clientes.
- ✓ V: Conjunto de todos los almacenes y clientes: $V = I \cup J$ y $V = \{1, 2, \dots, M, M+1, M+2, \dots, M+N\}$.

- ✓ E : Conjunto de arcos (i, j) que conectan cada par de nodos $i, j \in V$.
- ✓ K : Conjunto de vehículos indexados por k y $K = \{1; 2; \dots; K\}$, K es el número de vehículos disponibles.
- ✓ T : conjunto de períodos de tiempo indexados por t y $T = \{1; 2; \dots; T\}$, T es el número de periodos.
- ✓ d_j^t : Demanda del cliente j en el periodo t .
- ✓ P_i : Capacidad del depósito i .
- ✓ Q_k : Capacidad del vehículo k
- ✓ O_i : Costo fijo de abrir un deposito en el sitio candidato i .
- ✓ F_k : Costo fijo de emplear el vehículo k
- ✓ C_{ij} : Costo de viaje asociado con el arco $(i, j) \in E$.
- ✓ B_j^t : Costo de la oportunidad perdida por la falta de servicio al cliente j en el periodo t .
- ✓ S_j : Tiempo de servicio al cliente j .
- ✓ f_k : Distancias adicionales del vehículo k .
- ✓ D : Distancia máxima de desplazamiento de los vehículos.
- ✓ A_k^t : Nivel de disponibilidad del vehículo k en el periodo de estaño que $A_k^t \in [0, 1]$

7.3 Decisión de variables

$$x_{ijk}^t = \begin{cases} 1 & \text{Si el vehículo } k \text{ en el periodo } t \text{ va directamente del cliente } i \text{ al cliente } j \\ 0 & \text{De otra manera} \end{cases}$$

$$y_{ij}^t = \begin{cases} 1 & \text{Si en el período } t \text{ la demanda del cliente } j \text{ es servido por el depósito } i \\ 0 & \text{De otra manera} \end{cases}$$

$$z_i = \begin{cases} 1 & \text{si se abre un depósito en el sitio indicado } i \\ 0 & \text{De otra manera} \end{cases}$$

U_{jk}^t = Variables auxiliares para restricciones de eliminación de sub-tour en ruta k

7.4 Función objetivo: El objetivo principal de este modelo es minimizar el costo total del sistema teniendo los gastos del depósito, los costos de enrutamiento y costos de oportunidad perdidos debido a la falta de capacidad de servicio en consideración.

Minimizar

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} O_i Z_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} F_k X_{ijk}^t \\ + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} C_{ij} X_{ijk}^t + \dots + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \left(1 - \sum_{i \in V} \sum_{k \in K} X_{ijk}^t \right) B_j^t \end{aligned} \quad (11)$$

Minimizar

$$\sum_{k \in K} f_k \quad (12)$$

Sujeto a

$$Cr(\sum_{i \in V} \sum_{j \in J} d_j^t X_{ijk}^t \leq Q_k) \geq DPI \quad \forall k \in K; \forall t \in T \quad (13)$$

$$Cr(\sum_{j \in J} d_j^t Y_{ij}^t \leq P_i Z_i) \geq API \quad \forall i \in I; \forall t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{k \in K} X_{ijk}^t \leq 1 \quad \forall j \in J; \forall t \in T \quad (15)$$

$$U_{lk}^t - U_{jk}^t + N X_{ljk}^t \leq N - 1 \quad \forall l, j \in J; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (16)$$

$$\sum_{j \in V} X_{ijk}^t - \sum_{j \in V} X_{jik}^t = 0 \quad \forall i \in V; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (17)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X_{ijk}^t \leq 1 \quad \forall k \in K; \forall t \in T \quad (18)$$

$$\sum_{u \in J} X_{iuk}^t + \sum_{u \in V \setminus \{j\}} X_{ujk}^t \leq 1 + Y_{ij}^t \quad \forall i \in I; \forall j \in J; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (19)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} (C_{ij} + S_j) X_{ijk}^t + f_k \leq A_k^t D \quad \forall k \in K; \forall t \in T \quad (20)$$

$$X_{ijk}^t \in \{0,1\} \quad \forall i \in V; \forall j \in V; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (21)$$

$$Y_{ij}^t \in \{0,1\} \quad \forall i \in I; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (22)$$

$$Z_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (23)$$

$$U_{jk}^t \in \{N \cup 0\} \quad \forall j \in J; k \in K; \forall t \in T \quad (24)$$

La función objetivo (11) representa la suma del depósito fijo, costos de ubicación, los costos fijos de emplear vehículos, los viajes de costos, costo total de las oportunidades perdidas, respectivamente. El objetivo de la función (12) muestra las distancias de viaje adicionales. Nota que, las distancias de viajes adicionales del vehículo k , denotadas por f_k , pueden obtenerse mediante el algoritmo de simulación estocástica. Las restricciones de probabilidad difusa (13) y (14) aseguran que todos los clientes son visitados dentro de la capacidad del vehículo y se asignan dentro de la capacidad del depósito con un nivel de confianza, respectivamente. Las restricciones (15) muestran que cada cliente debe ser servido dentro de solo una ruta y solo tiene un cliente conectado en su predecesor, si recibió el servicio. Las restricciones de eliminación de un segundo viaje se aseguran en la restricción (16). La continuidad de las rutas y el retorno al depósito original se garantiza mediante la restricción (17). Las restricciones (18) aseguran que cada vehículo k pueda usarse en cada período de tiempo una vez. Las restricciones (19) aseguran que un cliente debe sea asignado a un depósito si hay una ruta conectada a él. La restricción (20) expresa la limitación de la distancia de viaje de los vehículos. Se debe tener en cuenta que, los tiempos de servicio deben transformarse a la escala de distancia en restricciones (20). Las restricciones (21) - (22) especifican las variables binaria usadas en la formulación y finalmente, variables auxiliares que toman los valores que se declaran en (24). (Ali Nadizadeh & Hasan , 2014)

8. Descripción del algoritmo genético

Para la solución del problema se determina la secuencia de clientes a ser servidos por un depósito, de igual manera asignarlos a aquellos que se encuentren disponibles. Así mismo, para resolver el problema de ruteo los clientes también deben ser atendidos por un vehículo específico. El procedimiento anteriormente mencionado se resuelve de igual forma que el algoritmo HHA expuesto por (Ali Nadizadeh & Hasan, 2014). A Continuación se describe por medio de 4 fases la solución propuesta en el presente problema. Cabe resaltar, que el problema de ruteo de vehículos se determina en conjunto con la localización de los correspondientes depósitos mediante un algoritmo genético.

8.1 Establecimiento de depósitos

Para iniciar la resolución del problema, en esta primera fase es necesario tener en cuenta los depósitos que se van a usar para servir los clientes, en este sentido se procede a realizar una clasificación en la matriz de posibles ubicaciones de los depósitos en función de la suma de las distancias calculadas entre cada depósito y las ubicaciones de todos los clientes. El cual, se realiza mediante la distancia euclidiana calculada mediante la ecuación (25). En dicha ecuación el resultado w_i indica la distancia total entre el depósito i y los c clientes, las coordenadas (x_i, y_i) es la posible ubicación denotada i para un depósito, la coordenada (a_j, b_j) es el cliente, N es el número de clientes, y M es el número de depósitos potenciales.

$$w_i = \sum_{j=1}^N [(x_i - a_j)^2 + (y_i - b_j)^2]^{1/2} \quad \forall i = 1, \dots, M \quad (25)$$

$$f_{i=\frac{P_i}{O_i \times W_i}} \quad (26)$$

Se calcula un factor (26) el cual es usado para clasificar las ubicaciones potenciales para los depósitos, donde P_i es la capacidad del depósito i y O_i es el costo fijo de abrir el depósito i , posteriormente las ubicaciones potenciales se ordenan descendientemente donde el mayor valor del factor f_i pertenece a la posible mejor ubicación teniendo en cuenta el número de depósitos que serán habilitados en donde depende de la suma del límite superior de las demandas difusas d^* en cada periodo de tiempo t .

Por consiguiente, los depósitos ordenados deberán habilitarse uno por uno hasta que la suma de las capacidades de los que han sido habilitados sea igual o mayor que f^* . Es importante notar que, los depósitos habilitados en esta fase, serán evaluados por un método de búsqueda local en la cuarta fase.

8.2 Agrupación de clientes

La segunda fase de esta resolución consiste en la distribución de clientes en grupos, los clientes se agrupan teniendo en consideración la distancia entre cada uno de estos, así como la capacidad difusa de los vehículos. Se implementa un algoritmo de búsqueda codiciosa (greedy search algorithm) para la formación de dichos grupos, en primera instancia un cliente es seleccionado de manera aleatoria del vector de clientes no agrupados. El algoritmo busca el cliente más cercano al anteriormente seleccionado en el grupo actual; este cliente no es asignado al grupo si su demanda supera la capacidad restante del vehículo, teniendo en consideración el parámetro DPI y la credibilidad del cliente evaluado. Cuando un nuevo cliente es asignado a un grupo, se calcula la demanda difusa total del grupo y se compara con la capacidad difusa del vehículo, si se obtiene que $Cr \geq DPI$ (de acuerdo a la formula (13), se permite que el nuevo cliente sea asignado a dicho grupo, caso contrario, se remueve este último cliente del grupo actual. Este proceso ayuda a

maximizar el uso de la capacidad del vehículo y si ningún cliente en el vector de clientes no agrupados es factible para ser asignado al grupo actual, el algoritmo forma un nuevo grupo. Este procedimiento se ilustra en la Figura 17.

8.3 Asignación de grupos a depósitos

En la tercera fase de esta resolución, los grupos de clientes son respectivamente asignados a los depósitos clasificados. Cada depósito atiende la mayor cantidad de grupos posibles, basado en el parámetro API y la credibilidad que indica si el siguiente grupo no sobrepasa la capacidad restante del depósito al que pretende ser asignado. Además, para asignar los grupos, se calcula la distancia euclidiana desde el centro de gravedad de un grupo hasta la ubicación del depósito mejor clasificado. El centro de gravedad de cada grupo se calcula según la ecuación (27), en la cual $(a(C), b(C))$ es la coordenada del centro de gravedad del grupo C, (a_j, b_j) es la coordenada del cliente j y n_C es el número de clientes asignados al grupo C.

$$(a_{(C)}, b_{(C)}) = \left(\frac{\sum_{j \in C} a_j}{n_C}, \frac{\sum_{j \in C} b_j}{n_C} \right) \quad (27)$$

Luego, los grupos no asignados son clasificados en orden ascendente basado en la distancia de su centro de gravedad a cada depósito y se procede a el grupo mejor clasificado asignándolo al depósito mejor clasificado, se evalúa la credibilidad entre dicho grupo y depósito, si se obtiene como resultado que $Cr \geq API$ el grupo es asignado a dicho depósito. Si existe una capacidad remanente en el depósito actual, se evalúa asignar el siguiente grupo al mismo. El proceso se repite para todos los depósitos hasta que todos los grupos han sido asignados.

8.3.1 Diagrama de flujo de asignación de grupos a depósitos.

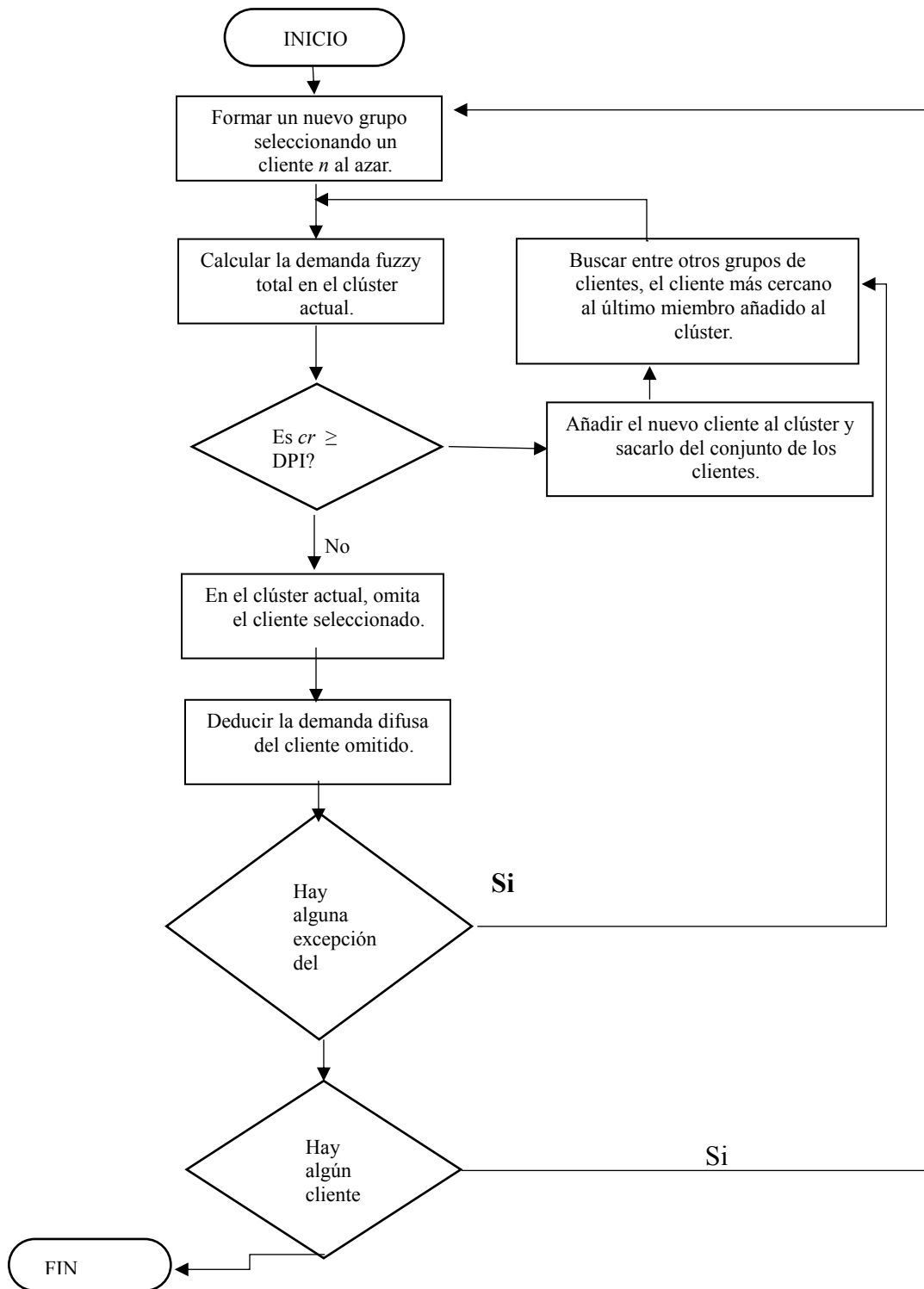


Figura 10. Diagrama de flujo asignación de grupos. Adaptado por (Ali Nadizadeh & Hasan, 2014).

8.4 Proceso de ruteo

8.4.1 Representación genética de los individuos: La representación de los cromosomas en el algoritmo genético tiene como propósito generar soluciones factibles adaptadas a los operadores genéticos y así reducir los espacios de búsqueda los cuales no generan soluciones apropiadas. En este estudio de investigación se utiliza la representación fundamentada en agrupación de clientes en un vector que permite codificar el programa como una secuencia de clientes, la codificación se conoce como cromosoma o genotipo que tienen cadenas de números el cual contiene la información requerida para la construcción de un organismo, cada número es un gen y cada gen del cromosoma representa la posición de un cliente.

Para la representación de la solución se consideran n clientes, k vehículos y i posibles candidatos para depósito. Es una representación que se describe en 3 pasos:

Paso 1: se hace una estimación donde el primer cliente es generado de manera aleatoria.

Pasó 2: una vez se genera el primer cliente aleatoriamente, se procede a crear un vector con los clientes que están alrededor ordenándolos de menor a mayor distancia respecto el primer cliente aleatorio, esto con el fin de agrupar los clientes. Esta distancia hallada se expone más adelante de mejor manera.

Paso 3: Posteriormente evalúa la capacidad del vehículo y se realizan iteraciones con la demanda fuzzy y la capacidad del vehículo para verificar que se pueda satisfacer la demanda del cliente con la capacidad del vehículo. Este proceso se puede observar de mejor manera en la figura 17.

8.4.2 Población inicial. El inicio del algoritmo genético consta de la generación de una población inicial de soluciones del problema, que es un conjunto de cromosomas generados de forma aleatoria, consta de las posibles permutaciones que se puedan tener del vector de clientes en un grupo, si el vector de clientes en un grupo es pequeño se hace posible hallar todas sus potenciales permutaciones sin esfuerzo computacional, sin embargo existe una pequeña restricción para grupos que tienen un número superior de clientes, puesto que el número de permutaciones crece factorialmente y se restringen los grupos grandes de clientes al tener un máximo de diez mil permutaciones aleatorias, esto con el objetivo de hacer una búsqueda extendida sobre el espacio de solución del problema. En la figura 11 se muestra los pasos de dicha estrategia de manera más detallada por medio de un diagrama de flujo.

8.4.2.1 Diagrama de flujo genético

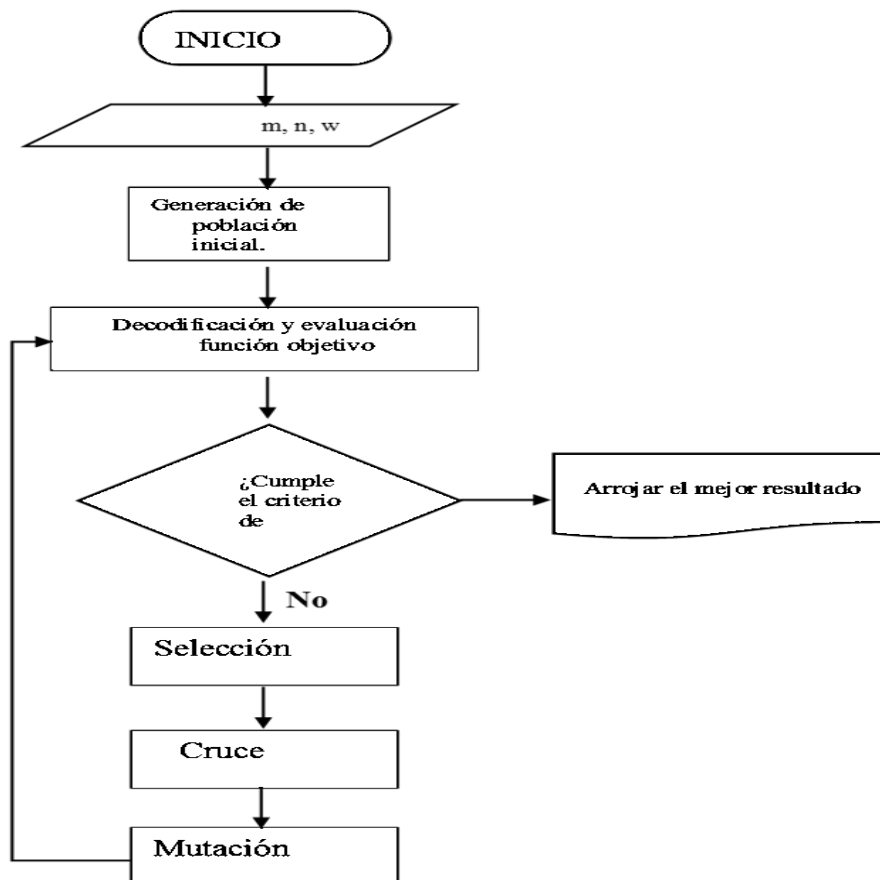


Figura 11. Diagrama de flujo genético.

8.4.3 Operador de selección. Para simular la selección natural de cromosomas en un sistema, se utiliza un operador por torneo. Este operador tiene como función elegir los individuos que se cruzaran para obtener descendientes. Los tipos de selección son: selección por torneo, aleatoria y de ruleta. La selección por torneo se efectúa mediante un pequeño subconjunto de individuos elegidos al azar desde la población. Los beneficios de este tipo de selección son la velocidad de aplicación (dado que no es necesario evaluar ni comparar la totalidad de la población) y la capacidad de prevenir, en cierto grado, la convergencia prematura (Goldberg, 1989).

Los datos de entrada de este operador consisten en una matriz que contiene las permutaciones del vector de clientes en cada grupo, para empezar, esta matriz es dividida en dos mitades, las cuales representan los mejores y los peores individuos respectivamente, cabe aclarar que las parejas destinadas a ser padres son seleccionadas aleatoriamente a partir de la mejor mitad, sin embargo como el objetivo es realizar una búsqueda más amplia, ambas mitades se desordenan aleatoriamente, de forma que sea posible emparejar soluciones buenas con otras no tan buenas. Siguiendo a esto se comparan una a una las soluciones de la primera con la segunda mitad y se selecciona la mejor en cada iteración de la comparación; los datos de salida de este operador consisten en una matriz que contiene la mitad de permutaciones que la de entrada. En otras palabras, la matriz contiene los cromosomas con los mejores valores fitness.

A continuación, se muestra Pseudocódigo del procedimiento del operador selección por torneo.

```

function selected = selection(evaluated)
ev = evaluated;
s = size(ev, 1);
if mod(s, 2) == 0
    mit1 = ev(1:s/2, :);
    mit2 = ev(s/2+1:end, :);
else
    s = s - 1;
    mit1 = ev(1:s/2, :);
    mit2 = ev((s/2)+1:end, :);
end
mit1 = shuffle(mit1, 1);
mit2 = shuffle(mit2, 1);
sel = [];
s = s/2;
for i = 1:s
    if mit1(i, end) > mit2(i, end)

```

Figura 12. Procedimiento del operador selección por torneo. Adaptado del lenguaje de Matlab.

8.4.4 Operador de cruce. El operador de cruce es un método que facilita compartir la información entre cromosomas por medio de dos individuos para conseguir una descendencia de estos. Los cromosomas son elegidos de manera aleatoria de la matriz de los padres, luego, estos cromosomas son apareados para generar hijos que tendrán información compartida con los padres.

Continuando con la idea de la selección natural, se procede a operar los cromosomas entre sí en pares, cada par de cromosomas procrean un par de hijos que tienen una forma idéntica a sus padres con otro orden en los genes, es decir los clientes en el vector están ordenados de otra forma. Los datos de entrada de este operador consisten en la matriz de salida del operador de selección, la cual está desordenada, es decir, no se tiene certeza de la ubicación de la mejor o peor solución en dicha matriz. A partir de esto, se unen los vectores en pares, luego se generan dos números aleatorios, el primero se encuentra en el rango del primer índice hasta la mitad, el segundo se encuentra en el rango de la mitad hasta el final del vector; usando estos valores como índices, se procede a cambiar los valores de número de cliente entre los padres en estos índices, así se produce el cambio en el cromosoma de los hijos, sin embargo, existen hijos no factibles los cuales tienen valores repetidos de clientes, esto genera una tasa de mortalidad en la población

y asegura que la población de salida sea menor o igual que la población inicial antes de la selección, de esta manera las soluciones van a converger en última instancia a una sola que resulta ser un óptimo local en el espacio de solución.

Ejemplo:

Como se mencionó anteriormente, En este operador se genera un número *Random* entero entre $(1, n)$ donde n corresponde al valor de la permutación es decir la cantidad de clientes que hay en la ruta y representa un máximo de posiciones a cruzar. Este valor va a indicar la cantidad de posiciones que se heredaran del padre 1 (P1) al hijo 1 (H1), las cuales son elegidas aleatoriamente y copiadas en S1 en la misma posición en la que se encuentra en P1, los demás genes del hijo 1 son heredados del padre 2 copiando las posiciones faltantes. Para el segundo hijo (H2) se genera un número *Random* entero entre $(1, n)$, para indicar la cantidad de posiciones a heredar del padre 2 (P2) y se repite el procedimiento descrito para el hijo 1.

Un ejemplo para aclarar lo dicho anteriormente es considerar que existen dos padres:

Padre 1 [2 1 3 6 5 5 8 8 7] y Padre 2 [1 3 2 4 6 5 7 7 9] como se muestra en la figura 13. Luego se generan dos hijos (Ver figura 13) H1 y H2 con base a la aplicación del operador de cruce aleatorio se realiza el siguiente procedimiento:

- Se selecciona aleatoriamente un número entero dentro del conjunto de números de clientes considerando que dicho valor debe estar entre $(1, n)$.

- Este número entre $(1, n)$, va a indicar la cantidad de genes que se heredarán, más adelante de acuerdo con esta cantidad, se generarán aleatoriamente las posiciones que se van a heredar del padre al hijo.

- Para el primer hijo (H1) se heredarán las posiciones asignadas previamente de forma aleatoria del padre 1 (P1) y las demás posiciones faltantes se heredarán con los genes del segundo padre

(P2), conservando las mismas posiciones.

- Para el segundo hijo (H2) se heredarán las posiciones asignadas previamente de manera aleatoria del padre 2 (P2) y las demás posiciones faltantes se heredarán con los genes del primer padre (P1), conservando las mismas posiciones.



Figura 13. Cromosomas de los padres. P1: Padre 1; P2: Padre 2.

Continuando con la idea de los dos cromosomas de los padres que se muestran en la *figura 13* para el hijo 1 el número aleatorio generado entre $(1, n)$ es 2, por consiguiente, se debe heredar 2 posiciones del P1 a S1, aleatoriamente se determina que estas posiciones son la 5 y la 7. Entonces S1 conserva las mismas posiciones del P1 los otros genes pertenecen a P2. Para el hijo 2 se elige aleatoriamente un número entre $(1, n)$ el cual da como resultado 3 posiciones aleatorias, 1, 3 y 6, las cuales se heredarán de P2, los genes faltantes se toman de P1 en la posición en la que se encuentran los espacios por completar. En la figura 14 se muestran de manera más clara el procedimiento mencionado.

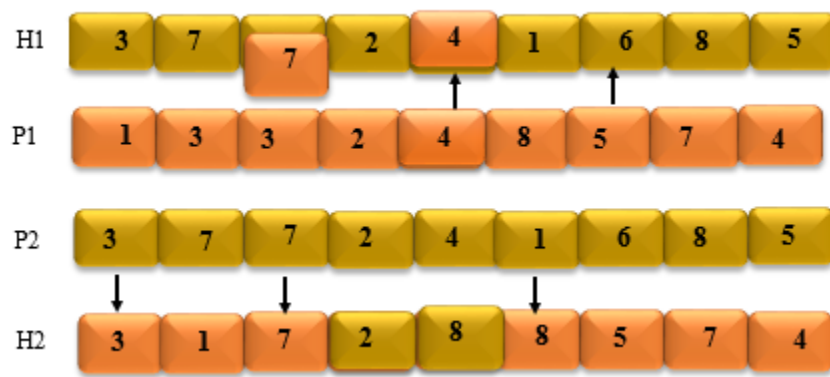


Figura 14. Matriz Generación de hijos mediante el operador de cruce aleatorio.

Es importante mencionar, los hijos generados por este método son decodificados y el mejor valor obtenido para la función objetivo es guardado con el objetivo de prevenir que se pierda, si el individuo es mutado al siguiente paso. A continuación, se muestra el Pseudocódigo del procedimiento del operador cruce aleatorio.

```
function crossed = cross(selected)
    sel = selected;
    s2 = size(sel, 2);
    cros = [];
    if mod(size(sel, 1), 2)
        %Case when the selected number is odd
        s1 = size(sel, 1) - 1;
        i = 1;
        %Ciclo para los normales
        while i < s1
            cros = [cros; sel(i, :)];
            cros = [cros; sel(i+1, :)];
            r1 = randi(s2);
            r2 = randi(s2);
            while r1 == r2 && s2 > 1
                r2 = randi(s2);
            end
        end
    end
```

Figura 15. Procedimiento del operador cruce aleatorio. Adaptado del lenguaje de Matlab.

8.4.5 Operador de mutación. La mutación se emplea para mejorar la diversidad de la población en el entorno y es un operador básico cuyo objetivo es hacer converger la solución a un óptimo local.

Mientras el operador de cruce efectúa una búsqueda a lo largo del espacio de solución, la mutación realiza cambios tenues en el cromosoma, lo cual deriva en una búsqueda más local. Los datos de entrada consisten en una matriz de cromosomas proveniente del cruce, para cada cromosoma se generan dos números aleatorios, de la misma forma que en el cruce, uno de estos se encuentra en la primera mitad y el otro en la segunda mitad respectivamente, luego se efectúa el cambio de los valores correspondientes a las posiciones que representan estos valores aleatorios.

A continuación, se muestra Pseudocódigo del procedimiento del operador mutación.

```
function mutated = mut(crossed)
    cr = crossed;
    s = size(cr, 1);
    s2 = size(cr, 2);
    if s2 > 1
        for i = 1:s
            r1 = randi(ceil(s2/2));
            r2 = randi([ceil(s2/2)+1, s2]);
            n1 = cr(i, r1);
            n2 = cr(i, r2);
            cr(i, r1) = n2;
            cr(i, r2) = n1;
        end
    end
    mutated = cr;
end
```

Figura 16. Procedimiento del operador mutación.

8.4.6 Simulación estocástica. En la cuarta fase del algoritmo se simula el proceso de ruteo a través de los clientes, para esto, se hace uso de un operador evaluador que incluye las restricciones del problema como la capacidad del vehículo y la capacidad del depósito, así como la evaluación de credibilidad y la generación de la demanda difusa en cada cliente de forma dinámica y devuelve como salida el valor de la función aptitud (fitness) medido sobre cada grupo. Las demandas difusas son calculadas a partir de los modelos planteados anteriormente los cuales están basados en simulación estocástica.

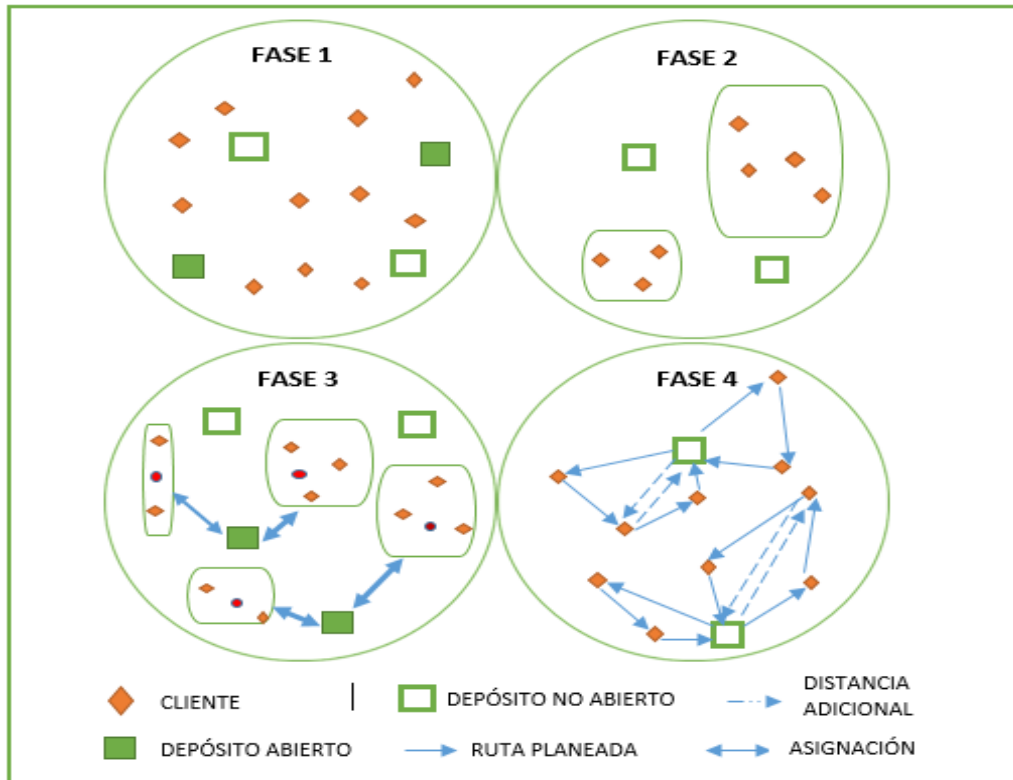


Figura 17. Ilustración del procedimiento de AG. Adaptado Ali Nadizadeh y Hasan Hosseini Nasab.

9. Validación del algoritmo genético

9.1 Resultados de la validación

El algoritmo propuesto en esta investigación para la solución del problema localización-ruteo dinámico capacitado con demandas difusas se valida mediante ocho instancias propuesta por el autor Barreto en el año 2007. Cada instancia contiene información sobre: Depósitos (Número de depósito, coordenada X, coordenada Y, capacidad y costo fijo) y Clientes (Número de clientes, coordenada X, coordenada Y y demanda).

Tabla 2.
Instancias.

Nombre de la instancias	nxd
Daskin95-88x8	88 x 8
Gaskell67-21x5	21 x 5
Gaskell67-22 x 5	22 x 5
Gaskell67-29 x 5	29 x 5
Gaskell67-32 x 5 ^a	32 x 5
Gaskell67-32 x 5b	32 x 5
Gaskell67-36 x 5	36 x 5
Min92-134 x 8	134 x 8

El algoritmo fue desarrollado en Matlab 2018b en un equipo con procesador Intel ® Core TM I5 con 16 GB de memoria RAM. En el apéndice A se encuentra los resultados completos, obtenidos en las corridas hechas para cada una de las instancias seleccionadas. A continuación, se muestra en la figura 18 el consolidado de los mejores resultados en cada instancia arrojados por el algoritmo genético (AG) donde se puede observar los mejores tiempos computacionales, costos de ruta planeada, distancia adicional y el costo total.

NOMBRE INSTANCIA	CONSOLIDADO DE RESULTADOS								
	RUTA PLANEADA	DISTANCIA ADICIONAL POR FALLA DE RUTA	CPU (seg)	COSTO POR DEPOSITO	NÚMERO DE DEPÓSITOS ABIERTOS	COSTO DE DEPOSITOS ABIERTOS	DPI	API	COSTO TOTAL DERUTA
DASKIN95-88X8	201.6768	0	10.1744	40	7	280	0.8	0.2	201.6768
GASKELL21x5	423.5538	7.2801	0.101	50	5	0	0.8	0.2	430.8339
GASKELL22x5	688.9992	0	13.3644	50	1	0	0.8	0.2	688.9992
GASKELL29x5	611.725	54.1448	0.6491	50	3	150	0.8	0.2	659.5793
GASKELL32x5a	537.2903	9.9	0.5984	50	2	0	0.8	0.2	547.1903
GASKELL32x5b	621.5216	0	7.5807	50	2	0	0.8	0.2	621.5216
GASKELL36x5	623.1489	36.4304	0.2263	50	1	50	0.8	0.2	659.5793
Min92-134 x 8	3277.9	0	0.1566	272	3	816	0.8	0.2	3277.9

Figura 18. Consolidación de los resultados de validación del algoritmo genético.

9.2 Análisis de sensibilidad para parámetros DPI y API

Para la validación del algoritmo genético propuesto se llevan a cabo un diseño de experimentos (3^K) para instancias existentes en la literatura *Barreto 2007* como se muestra en la tabla (4). El algoritmo genético fue desarrollado en el software matemático Matlab versión 2018b. El diseño experimental fue realizado con 3 valores y 2 parámetros (3^2).

Tabla 3.
Parámetros DPI y API.

<i>Parámetros</i>	<i>Valores</i>
DPI API	0.2
	0.5
	0.8

En la presente investigación se realizaron variaciones en el intervalo de $[0,1]$ para el índice de preferencia del despachador (DPI) y el índice de preferencia de asignación (API) donde empíricamente se tomaron los valores 0.2, 0.5 y 0.8 para validar las instancias en el algoritmo genético, teniendo en cuenta que estos generan resultados más óptimos.

A continuación, los resultados computaciones se muestran para los parámetros DPI y API en instancias de tamaño diferente.

Se observa en las tablas (5 y 6), que para las 9 soluciones arrojadas por el diseño experimental (3^2) cuando el DPI es igual 0.8 y el valor de API es 0.2 el costo total presenta un valor mínimo, por lo tanto la distancia adicional por fallo de ruta también es mínima respecto a las demás soluciones. A demás, el mínimo tiempo computacional para las dos instancias de prueba (CPU) Gaskell67-21x5 y Gaskell67-32x5 es 0.101 y 0.598 segundos respectivamente y también se encuentran en la mejor solución generada para las instancias. Esto indica la eficiencia de

generación de resultados el algoritmo propuesto.

Para los valores más bajos de DPI se aprecia que el costo total de ruta aumenta y también se presenta un aumento en el número de casos en que el vehículo visita al cliente, pero no lo puede servir por lo tanto se aumenta la distancia total adicional por fallo de ruta esto debido a que el vehículo solo puede conocer la demanda una vez visita el cliente.

Se resalta el aumento de la satisfacción de demanda al cliente por el vehículo para los valores más altos del DPI, lo que significa tener menos costos de distancia adicional por fallo de ruta.

El establecimiento de varios depósitos con mayor capacidad puede proporcionar un alto nivel de respuesta sirviendo al cliente.

Tabla 4.
Resultados Gaskell67-21x5.

GASKELL21x5								
D P I	A P I	Ruta planeada	Distancia Adicional	CPU (sg)	Costo por Depósito	Depósito s Abiertos	Costo Depósitos Abiertos	Costo Total
0.2	0.2	442.82	11.1803	7.04	50	5	250	454.006
	0.5	532.39	26.096	0.13	50	5	250	558.494
	0.8	509.44	58.3721	0.17	50	5	250	567.816
0.5	0.2	566.62	112.614	0.11	50	5	250	679.235
	0.5	564.70	146.904	0.10	50	4	200	711.607
	0.8	433.46	85.4904	0.12	50	5	250	518.952
0.8	0.2	423.55	7.2801	0.10	50	5	250	430.833
	0.5	442.90	12.8062	0.13	50	4	200	455.714
	0.8	463.57	26.2354	0.12	50	4	200	489.811

Tabla 5.
Resultados Gaskell67-32x5a.

GASKELL 32x5-a								
D P I	A P I	Ruta planeada	Distancia Adicional	CPU (seg)	Costo por Depósito	Depósito s Abiertos	Costo Depósito s Abiertos	Costo Total
0.2	0.2	699.16	41.4911	7.044	50	3	150	740.6
	0.5	716.18	66.9041	7.513	50	3	150	783.0
	0.8	674.91	38.6815	7.462	50	3	150	713.6
0.5	0.2	714.56	38.4708	0.987	50	3	150	753.0
	0.5	700.21	43.025	6.729	50	3	150	743.2
	0.8	670.04	72.0594	0.613	50	3	150	742.1
0.8	0.2	537.29	9.9	0.598	50	2	100	547.1
	0.5	736.68	27.4591	0.747	50	3	150	764.1
	0.8	638.24	30.3961	0.641	50	2	100	668.6

10. Caso estudio para la ciudad de Bucaramanga

En esta investigación para completar con la validación del modelo propuesto se elige un caso de estudio de la ciudad de Bucaramanga donde se tiene información de la ubicación de los albergues dispuestos ante una emergencia post-desastre, la capacidad de estos y el centro de distribución de recursos, encontrados en el artículo “ *An ABC algorithm for solving the post-disaster resources distribution problem, a case study*” (Lamus, Aguilar, Martinez, Barrera, & Hernandez, 2018).

Se debe tener en cuenta que para la validación del AG los albergues juegan el papel de los

clientes y la capacidad como la demanda a satisfacer; se escogieron las posibles mejores rutas teniendo en cuenta la variación del DPI y API donde los mejores resultados arrojados para Bucaramanga del DPI Y API son aproximadamente 0.2 y 0.5 respectivamente. Se puede observar para este caso, las rutas se trazan a partir del procedimiento que mejor se ajuste para encontrar la distancia entre nodos, el recorrido y las rutas establecidas para una situación de emergencia post desastre sísmico en la ciudad nombrada. Cada ruta está conformada por nodos de menor a mayor distancia respecto al centro de distribución esto con el fin de lograr una óptima ruta planificada disminuyendo las distancias adicionales por fallo de ruta la cual contribuye a la disminución de costos para una óptima solución. Las rutas escogidas como factibles deben ser recorridas por los vehículos disponibles con una capacidad definida. Cabe resaltar que el CDI debe satisfacer la demanda de todos los clientes ya que es el único depósito establecido para la distribución de recursos en la ciudad de Bucaramanga según datos de la alcaldía de Bucaramanga-Santander. En el apéndice (A) se encuentran el total de resultados arrojados.

Tabla 6.
Resultados caso Bucaramanga.

Costo total de ruta	Ruta planeada	Distancia adicional por falla de ruta	CPU (seg)	DPI	API
1.7703	1.6507	0.1202	14.2353	0.2	0.2
1.7384	1.5504	0.1885	9.4266	0.2	0.5
1.918	1.676	0.242	9.3865	0.2	0.8
2.2305	1.8688	0.3617	2.0859	0.5	0.2
2.09445	1.776	0.31845	6.8503	0.5	0.5
2.0958	1.7906	0.3052	3.5038	0.5	0.8

Se toma el mapa de la división política de la ciudad de Bucaramanga para ubicar el CEDI (depósito) y los clientes pertenecientes a esta investigación. Se resalta que en el desarrollo y validación del modelo las instancias utilizadas de la literatura contenían entre cinco y ocho

depósitos como máximo por lo tanto para Bucaramanga solo se tuvo en cuenta un depósito (CEDI) ya que es el único existente, información irrelevante en el desarrollo del algoritmo ya que este es una herramienta práctica hacia la atención de damnificados y otras áreas de investigación.

Según lo anterior se usa la herramienta de georreferenciación de Google Maps, el cual permite establecer la localización exacta. Los clientes (albergues) están ubicados en Instituciones Educativas, parques, canchas, velódromo, coliseos y estadios.

A continuación, en la figura 19 se muestra la simbología aplicada en el mapa político de la ciudad de Bucaramanga y en la figura 20 se pueden observar los clientes y el centro de distribución ubicados en el mapa.

Lugar	Icono
Centro de Distribución	
Cientes	 Institución Educativa.  Parques.  Estadios, Coliseos.  Velódromo  Cancha de futbol.

Figura 19. Simbología implementada.

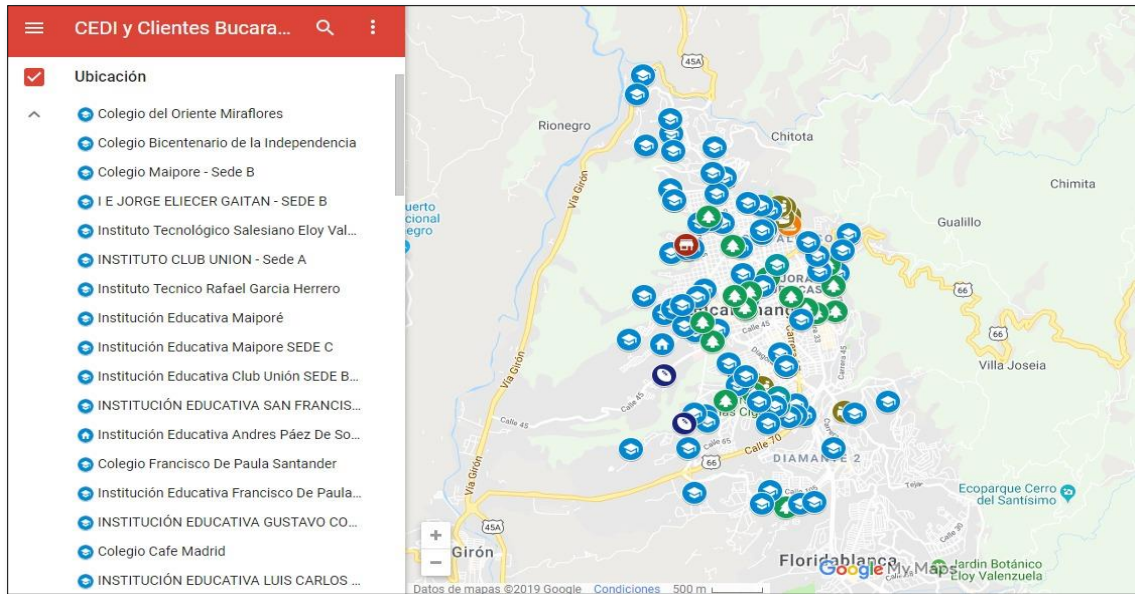


Figura 20. Ubicación de clientes y CDI. Adaptado de Google Maps.

11. Resultados

En el algoritmo genético se consideró una población inicial dependiendo de los clientes en el clúster, es decir varían, si en el clúster existen menos de tres clientes la población inicial será de 10 individuos, si está entre tres y seis clientes la población será de 100 individuos, si está entre seis y nueve clientes se tendrá una población inicial de 1000 y si es mayor a nueve la población será de 10000 individuos, por lo tanto se tiene en cuenta que el número de iteraciones depende del tamaño de la población. Sin embargo, cuando se presentan cromosomas muy grandes se deben hacer mayor número de iteraciones de manera proporcional para generar soluciones más factibles.

Por medio del operador de selección por torneo se escoge la mitad de las soluciones, las cuales corresponden a los mejores individuos para hacer padres. Este proceso de selección se realizó de

forma aleatoria. Posteriormente se procede al cruce aleatorio donde se crea una descendencia entre los cromosomas para ser elegidos de manera aleatoria dos padres y generar dos hijos que tienen la información compartida con los padres; se resalta la importancia de este operador ya que permite no tener valores repetidos de opción de ruta, es decir la ruta no violará la capacidad del vehículo en ningún momento, luego se procede a la mutación.

Al finalizar todo el proceso con la población (selección, cruce y mutación) se debe conformar la siguiente generación obteniendo los mejores padres e hijos teniendo en cuenta la función fitness hasta completar todos individuos que conformar la siguiente generación.

Es de vital importancia destacar como aspecto relevante del proyecto las rutas que se generan por el algoritmo genético para iniciar la distribución de las ayudas humanitarias, ya que satisfacer las necesidades de las personas damnificadas es prioridad en una emergencia.

En el desarrollo de la investigación se realiza la comparación de soluciones factibles de las instancias obtenidos en la validación del AG.

11.1 Solución factible HHA vs AG

Para evaluar la eficiencia de AG respecto al HHA propuesto en el artículo “Solving the Dynamic capacitated location-routing problem with fuzzy demands by hybrid heuristic algorithm” propuesto por los autores (*Ali Nadizadeh & Hasan Hosseini Nasab*, 2014).

Para usar las instancias de prueba estándar de CLRP en caso de DCLRP-FD, se realizan algunos cambios en CLRP que requieren las instancias. Los siguientes pasos heurísticos muestran el proceso de cambiar una instancia de CLRP a una DCLRP-FD el cual desarrolla el algoritmo genético planteado en el presente problema:

Paso 1: Al principio, la demanda determinista de cada cliente se transforma en una demanda difusa triangular de la siguiente manera: (1) se considera la demanda determinista de cada cliente en el CLRP como el límite izquierdo de la demanda difusa en DCLRP-FD; (2) calcular el límite derecho de la demanda difusa por el triple del límite izquierdo obtenido de (1); (3) posteriormente se considera un número *Randon* en el rango de 1,5 a 2,5 veces del límite izquierdo como el número medio de la demanda triangular difusa.

Paso 2: Para cada período de planificación, se debe realizar el paso 1 para calcular la demanda de los clientes en cada período.

Paso 3: Considere los límites máximos correctos de las demandas fuzzy de todos los clientes como D_{3j} es decir ($D_{3j} = \max_{j \in J}$). Compare D_{3j} con la capacidad del vehículo de la instancia CLRP indicada por Q . Si se satisface la relación $D_{3j} \leq Q$, entonces considere Q como el vehículo de capacidad de la instancia DCLRP-FD. De lo contrario, considere D_{3j} como la capacidad del vehículo de la instancia DCLRP-FD.

Paso 4: Triplicar la capacidad del depósito de la instancia de CLRP y considerar eso como la capacidad del depósito de la instancia DCLRP-FD.

A continuación, se muestra mediante una variación de resultaos (GAP) la eficiencia del algoritmo genético. En la tabla 7 se evidencia en la primera columna el nombre de las instancias que se utilizaron. La columna siguiente indica la solución factible encontrada en el HHA DCLRRP-FD usado en el artículo anteriormente mencionado, la tercera columna muestra el costo total el cual presenta una mejoría respeto al HHA para cada una de las instancias por encima del 80%.

Tabla 7.
Solución factible HHA vs Genético.

	Solución factible HHA DCLRP- FD	Ruta Planeada	Distancia Adicional	Costo Total	GAP
Gaskell67-21 x 5	2989.6	423.5538	7.2801	430.8339	86%
Gaskell67-22 x 5	4106.5	688.9992	0	688.9992	83%
Gaskell67-32 x 5a	3903	537.2903	9.9	547.1903	86%
Gaskell67-32 x 5b	3740.9	621.5216	0	621.5216	83%

12. Conclusiones

- Según en la revisión de la literatura el problema DCLRP-FD ha sido de muy poco estudio ya que contiene parámetros difusos, por lo cual el proyecto es pionero y puede ser abordado en futura investigaciones con otras características.
- Con el AG propuesto en esta investigación se evidencia que la generación de la técnica de clústerización responde a la necesidad de lograr una correcta asignación de nodos por vehículo para facilitar de esta forma el ruteo y así alcanzar una distancia total mínima a recorrer evitando costos adicionales por fallos de ruta, lo cual es importante en el desarrollo de una respuesta oportuna ante una emergencia en un desastre natural (sismo).
- Los experimentos computacionales realizados mostraron que el índice de preferencia del despachador (DPI) influye en gran medida en la longitud de las rutas planificadas, distancia adicional y costos por fallo de ruta.

13. Recomendaciones

- Promover la realización de proyectos de grado en el área de investigación de operaciones utilizando AG y evolutivos ya que busca soluciones más locales.
- Se recomienda para futuras investigaciones tratar el problema DCLRP-FD con el fin de evaluar la posibilidad de abrir más centros de distribución para la atención pos-desastre sísmico en la ciudad de Bucaramanga para lograr soluciones más factibles ya que en la actualidad se cuenta solo con uno.

Referencias Bibliográficas

- Ali Nadizadeh , N., & Hasan , N. (2014). Solving tthe Dynamic capacitated location-routing problem with fuzzy demands by hybrid heuristic algorithm. *European Journal of Operational Research*, 458-470.
- Ambrosino, D., & Scutella, M. G. (2005). Distribution network design: New problems and related models. *European Journal of Operational Research*, 165,610-624.
- Beasley, J., & Chu, P. (1996). A genetic algorithm for the set covering problem. *European Journal of Operational Research*, 392-404.
- Begoña V, t. (s.f.).
- Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. *ACM Computing Surveys*, 268-308.
- Bogdanović, M. (2011). On Some Basic Concepts of Genetic Algorithms as a Meta-Heuristic Method for Solving of. *Journal of Software Engineering and Applications*, 482-486.
- Brito, J., Martínez, F. J., Moreno, J. A., & Verdegay, J. L. (2015). An ACO hybrid metaheuristic for close–open vehicle routing problems with time windows and fuzzy constraints. *Applied Soft Computing* , 32,154-163.
- Brito, S. (2013). Optimización de rutas de distribución con información y restricciones difusas. Universidad de La Laguna.

- Campos García , A., Díaz Giraldo, C., Rubiano Vargas, D. M., Costa Posada, C. R., & Ramírez Cortés, F. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres para Colombia* (1 ed.). Bogotá, Colombia: 1818 H Street, NW.
- Cardona, O. D., & Yamín, L. E. (octubre de 2006). *Gestion del riesgo en colombia*. Obtenido de *Gestion del riesgo en colombia*: http://www.desenredando.org/public/varios/2007/varios_omar/Estudio_Colombia_BID-CEPAL.pdf
- Corrales Reyes, I. E., Fornaris Cedeno, Y., & Reyes Pérez, J. J. (2017). *Análisis bibliométrico de la revista investigación en educación médica*. *Investigacion en educación médica*, pág 9.
- Diaz Gomez, P., & Hougen, D. (2007). *Initial Population for Genetic Algorithms: A Metric Approach*. *Proceeding of GEM – International Conference on Genetic and Evolutionary Method*, 43-49.
- Escorcía, T. (2008). *El Análisis Bibliométrico Como Herramienta Para el Seguimiento de Publicaciones Científicas, Tesis y Trabajos de Grado*. (Tesis). Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.
- Fazel Zarandi, M. H., Hemmati, A., Davari , S., & Turksen, I. B. (2013). *Capacitated location-routing problem with time windows under uncertainty*. *Knowledge-Based Systems*, 37,480-489.
- Ghannadpour , S. F., Noori , S., Moghaddam, R. T., & Ghoseir, K. (2014). *A multi-objective dynamic vehicle routing problem with fuzzy time windows: Model, solution and application*. *Elsevier*, 14,504-527.

- Hakan , T., & Sercan, D. (2015). A Genetic Algorithm Based Approach to Provide Solutions for Emergency Aid Stations Location Problem and a Case Study for Pendik/İstanbul. *Homeland Security & Emergency Management*, 915-940.
- Hassanzadeh, A., Mohseninezhad, L., Tirdad, A., Dadgostari, F., & Zolfagharinia, H. (2009). Localitation-Routing Problem. *Physica-Verlag Heidelberg*.
- Kovács, G., & Spens, K. (2007). Humanitarian logistics in disaster relief operations. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 99-114.
- Kuo, R. J., Wibowo, B. S., & Zulvia, F. E. (2016). Application of a fuzzy ant colony system to solve the dynamic vehicle routing problem with uncertain service time. *Elsevier*, 40,9990-10001.
- Lamus, H., Aguilar, K., Martinez, D., Barrera, A., & Hernandez, A. (2018). An ABC algorithm for solving the post-disaster resources distribution problem, a case study. *Boletin de Estadistica e Investigacion Operativa*, 117-137.
- Laporte, G., & Dejax, P. J. (1989). Dynamic Localitation-Routing Problems. *Journal of the Operational Research Society*, 40,471-482.
- Liu, B., & Li, X. (2006). A su fi ciente y condición necesaria para medidas de credibilidad. *Syst base-Conocimiento Int J incierto Tolerancia*, 43-52.
- Mehrjerdi , Y. Z., & Nadizadeh, A. (2013). Using greedy clustering method to solve capacitated location-routing problem with fuzzy demands. *European Journal of Operational Research* , 229,73-84.

- Mitchell , M. (1999). An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge, Massachusetts • London, England: Copyright.
- Morales Luna, G. (2002). Introducción a la lógica difusa. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN.
- Nadizadeh, A., & Hosseini Nasab, H. (2014). Solving the dynamic capacitated location-routing problem with fuzzy demands by hybrid heuristic algorithm. European Journal of Operational Research, 238,458-470.
- Ochoa. (Mayo de 2013). Bienvenidos a las naciones unidas. Obtenido de Bienvenidos a las naciones unidas: <http://www.un.org/es/humanitarian/overview/disaster.shtml>
- Rodriguez Uría, V., Pérez Gladish, B., & Alonso García, S. (1997). Optimización Dinámica. Teoría del control óptimo. Universidad de Oviedo.
- Salhi, S., & Nagy, G. (1999). Consistency and robustness in location routing. Studies in locational Analysis, 13,3-19.
- Shouying, L., & Huijuan, Z. (2014). Optimization model of fuzzy location-routing problem of victim search in flood disaster. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 6,2080-2085.
- Shuanglin , L., ZuJun, M., & Zheng, B. (2014). Dynamic multi-objective location-routing problem in post-earthquake logistics system. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 1515,20.
- Sivanandam, S., & Deepa, S. (2008). Introduction to Genetic Algorithms. Springer.

- Velásquez Gómez, R. (11 de Marzo de 2015). El Colombiano. Obtenido de El Colombiano:
<http://www.elcolombiano.com/colombia/de-porque-tiembla-tanto-en-la-zona-de-santander-GX1473383>
- Victoriano, B. O. (2011). A multi-criteria optimization model for humanitarian aid distribution. *Journal of Global Optimization*, 189-208.
- Victoriano, B., Ortuño, T., Tirado, G., & Montero, J. (2011). A multi-criteria optimization model for humanitarian aid distribution. *Journal of Global Optimization*, 189-208.
- Wang, S. R., & Ma Zu, J. (2011). Fuzzy Dynamic LRP with Time Windows in Post-Earthquake Emergency Logistics Systems. *Operations Research and Management Science*.
- Yi, W., & Ozdamar, L. (2007). A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities . *European Journal of Operational Research* , 179,1177-1193.
- Zadeh, L. (1965). conjuntos difusos. *informar de control*, 338-353.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 88, 338-353.
- Zadeh, L. A. (1971). Quantitative Fuzzy Semantics. *Information Sciences*, 3, 159-176.
- Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility. . En *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 1,3-28.
- Zarandi , M., Hemmati, A., Davari, S., & Turksen, I. (2013). Capacitated location routing problem with time windows under uncertainty. *SciVerse ScienceDirect*.
- Zheng, Y., & Liu, B. (2006). Fuzzy vehicle routing model with credibility measure and its hybrid intelligent algorithm. *Applied Mathematics and Computation* , 673-683.