

**Localización de instalaciones y Asignación de recursos mediante un algoritmo heurístico,
para la atención post-desastre, en caso de inundación o remoción de masa**

Lina Ximena Morales Celis

Sergio Andrés Palacios Valencia

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Industrial

Director

PH.D. Henry Lamos Díaz

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2017

Dedicatoria

A mis padres, por ser el soporte de mi vida y mi ejemplo a seguir.

A mi hermana, por ser mi apoyo cuando más lo he necesitado.

A Luna, por estar siempre a mi lado.

A mi familia, mis amigos y mi novio, por acompañarme en los buenos y malos momentos.

A mi compañero de proyecto, por haber conformado un excelente equipo de trabajo.

Lina Ximena Morales Celis.

A Dios, que es pieza fundamental de mi vida, porque él todo lo hace posible.

A mis Padres, por su ayuda incondicional y por todos los sacrificios que han hecho para hacernos mejores personas a mí y a mis hermanas.

A mi hermana Diana, por ser la persona con la que siempre puedo contar.

A mi hermana Johanna, por su buen ejemplo.

A Lina, por ser la mejor compañera de proyecto.

A mis amigos por acompañarme en ésta etapa y contribuir en mi formación.

Sergio Andrés Palacios Valencia.

Agradecimientos

A Dios, por hacer posible éste triunfo.

A nuestro director, por su constante apoyo, múltiples enseñanzas y disposición a lo largo de la realización del proyecto.

A todos los docentes que nos transmitieron parte de sus conocimientos en las clases, formándonos como profesionales integrales.

A los compañeros del grupo OPALO, por su apoyo y enseñanzas; que permitieron la realización de éste trabajo.

Al grupo OPALO por incentivar y promover la investigación, y por brindar las herramientas necesarias para la realización de éste y muchos más trabajos.

Tabla de contenido

1. Introducción	15
2. Revisión de la Literatura	18
3. Planteamiento del Problema.....	26
4. Marco de Antecedentes	28
4.1. Trabajo 1	28
4.2. Trabajo 2	29
4.3. Trabajo 3	29
5. Justificación del Problema	30
6. Objetivos	31
6.1. Objetivo general	31
6.2. Objetivos específicos.....	31
7. Marco Teórico	32
7.1. Logística.....	32
7.2. Investigación de operaciones	34
7.3. Complejidad computacional.....	38
7.4. Métodos de solución.....	39
7.5. El modelo de Localización-Asignación	46
8. Identificación de Posibles Albergues en Bucaramanga y Área Metropolitana	48
8.1. Bucaramanga.....	49
8.2. Área Metropolitana de Bucaramanga.....	52
9. Caracterización y Evaluación de las Instalaciones Propuestas	55
9.1. Criterios de Ubicación y Selección de un Albergue	55
9.2. Caracterización de Posibles Albergues	57
10. Formulación del Modelo	62
10.1. Objetivo del modelo.....	62
10.2. Formulación matemática del problema	62
11. Diseño de los Algoritmos Heurísticos.....	64

11.1. Representación de la solución	64
11.2. Función objetivo.....	65
11.3. Pasos lógicos de los algoritmos.....	66
12. Instancias.....	69
12.1. Validación de los algoritmos.....	70
13. Aplicación del Algoritmo al Caso de Estudio.....	72
13.1. Levantamiento de la información.....	72
13.2. Análisis de la información (Mapas)	73
13.3. Casos de Estudio	74
14. Referencias Bibliográficas	81

Lista de Tablas

Tabla 1. Cumplimiento de objetivos del Proyecto.....	17
Tabla 2. Descripción de criterios de localización de albergues temporales.....	56
Tabla 3. Localización posibles albergues Municipio de Bucaramanga.....	59
Tabla 4. Localización posibles albergues Municipio de San Juan de Girón.....	60
Tabla 5. Localización posibles albergues Municipio de Piedecuesta.....	60
Tabla 6. Localización posibles albergues Municipio de Floridablanca.....	61
Tabla 7. Comparación de resultados obtenidos mediante Heurístico Ardalan.....	72
Tabla 8. Comparación de resultados obtenidos mediante el Heurístico Kruskal modificado.....	72
Tabla 9. Comparación de resultados obtenidos mediante Heurístico Prim modificado.....	72
Tabla 10. Resultados caso de estudio N°1 Bucaramanga.....	75
Tabla 11. Resultados caso de estudio N°2 San Juan de Girón.....	76
Tabla 12. Resultados caso de estudio N°3 Piedecuesta.....	76
Tabla 13. Resultados caso de estudio N°4 Floridablanca.....	77

Lista de Figuras

Figura 1. Población expuesta a movimientos de masa, sismos e inundaciones en Colombia..	26
Figura 2. Representación del estado de los albergues.....	63
Figura 3. Representación de la asignación de albergues.....	64
Figura 4. Representación del proceso con el algoritmo heurístico de Prim.....	65
Figura 5. Representación del proceso con el algoritmo heurístico de Kruskal.....	66
Figura 6. Representación del proceso con el algoritmo heurístico de Prim.....	67
Figura 7. Simbología de instalaciones en los mapas.....	72
Figura 8. Mapa del municipio de Girón con identificación de albergues y Puntos de demanda.....	72

Lista de Apéndices

Apéndice A. Mapa de identificación de riesgos, puntos de demanda y albergues en Bucaramanga

Apéndice B. Mapa de identificación de riesgos, puntos de demanda y albergues en Girón

Apéndice C. Mapa de identificación de riesgos, puntos de demanda y albergues en Piedecuesta

Apéndice D. Mapa de identificación de riesgos, puntos de demanda y albergues en Floridablanca

Apéndice E. Tabla Caracterización y puntuación de albergues del municipio de Bucaramanga

Apéndice F. Tabla Caracterización y puntuación de albergues del municipio de Girón

Apéndice G. Tabla Caracterización y puntuación de albergues del municipio de Piedecuesta

Apéndice H. Tabla Caracterización y puntuación de albergues del municipio de Floridablanca

Apéndice I. Matriz origen-destino de los puntos de demanda a los albergues de los municipios Bucaramanga, Girón, Piedecuesta y Floridablanca

Apéndice J. Código de programación de los Algoritmos Heurísticos

Apéndice K. Artículo de carácter publicable

Resumen

Título: “Localización de instalaciones y Asignación de recursos mediante un algoritmo heurístico, para la atención post-desastre, en caso de inundación o remoción de masa.”*

Autores:

Lina Ximena Morales Celis

Sergio Andrés Palacios Valencia**

Palabras clave:

Logística Humanitaria, Problema de Localización-Asignación, Atención Post-desastre, Desastres Naturales, Algoritmos Heurísticos.

Descripción:

En la presente investigación se aborda un problema de Localización-Asignación con restricción de capacidad de las instalaciones del área Logística Humanitaria, llamado Problema de Ubicación de Instalaciones con Capacidad o CFLP, por sus siglas en inglés, para hacer frente a la ocurrencia de un desastre natural en las zonas más afectadas de la Ciudad de Bucaramanga y su Área metropolitana, con el fin de suplir la necesidad de albergue de las personas afectadas en dicho escenario. El propósito del estudio es Localizar instalaciones que se puedan adaptar como albergues para los diferentes puntos de demanda en cada municipio, asignando a estos albergues la demanda de la población afectada; teniendo como objetivo principal la minimización del tiempo de servicio, y por consiguiente la mitigación de pérdida de vidas humanas. Para dar solución se hace uso de tres algoritmos heurísticos: Ardalan, Prim y Kruskal, para resolver el modelo matemático planteado.

El algoritmo fue validado con instancias encontradas en Sobolev Institute of Mathematics, disponibles para problemas de “Capacitated Facility Location Problem”, mediante el programa Python. En los resultados de la comparación entre la respuesta de los algoritmos propuestos y el resultado óptimo de la literatura, se puede observar que mediante los algoritmos se obtienen respuestas aceptables en un tiempo muy corto.

Se demuestra el enfoque práctico del modelo mediante la presentación de cuatro casos de estudio en los municipios de Bucaramanga, Girón, Piedecuesta y Floridablanca; determinando la ubicación de albergues y asignación de puntos de demanda a dichos albergues, por medio de la herramienta computacional diseñada.

*Proyecto de grado.

**Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Programa de Ingeniería Industrial. Director: PhD Henry Lamos Díaz.

Abstract

Title: “Location of facilities and allocation of resources using a heuristic algorithm, for post-disaster attention, in case of flood or mass removal.”*

Authors:

Lina Ximena Morales Celis

Sergio Andrés Palacios Valencia**

Key words:

Humanitarian Logistics, Location-Allocation problem, Post-disaster assistance, Natural Disasters, Heuristic Algorithms.

Description:

The present investigation addresses a Location-Allocation problem with restriction of capacity of the facilities from Humanitarian Logistics, called Capacitated Facility Location Problem (CFLP), to deal with the occurrence of a natural disaster in the high risk zones from Bucaramanga and its Metropolitan Area, with the objective of supply the need for shelter of the people affected in that ecscenary. The purpose of the study is Locate facilities that can be adapted as shelters for the different points of demand in each municipality, assigning to these shelters the demand of the affected population; Having as main objective the minimization of the time of service, and consequently the mitigation of loss of human lives. To solve this problem, three heuristic algorithms are used: Ardalan, Prim and Kruskal, to solve the mathematical model proposed.

The algorithm was validated with instances found in Sobolev Institute of Mathematics, available for a Capacitated Facility Location Problem, through the Python program. In the results of the comparison between the proposed algorithm response and the optimal literature result, it can be observed that the algorithms provide acceptable responses in a very short time.

The practical approach of the model is demonstrated through the presentation of four case studies in the municipalities of Bucaramanga, Girón, Piedecuesta and Floridablanca; determining the location of shelters and allocation of demand points to said shelters, through the computational tool designed.

* Graduation Project.

** Faculty of Engineering physicomechanical. School of Industrial and Business Studies. Directed by Henry Lamos Diaz PhD.

1. Introducción

Son varios los factores que contribuyen a la aparición de desastres naturales como incendios, huracanes, terremotos, inundaciones, remoción de masa, entre otros; la mayor parte de estos factores son causados por los seres humanos, los cuales realizan actividades que afectan el medio ambiente, entre estas se encuentran la contaminación, la explotación indiscriminada de recursos naturales como bosques, suelos y minerales, y la construcción de viviendas en zonas de alto riesgo. Según la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR), al año 2020, el 82% de los latinoamericanos viviremos en las zonas urbanas (PNUD, 2009). A esto debemos sumar que más del 50% de la población de los conglomerados urbanos habita en espacios de desarrollo informal, caracterizados por una alta vulnerabilidad a amenazas naturales; razones que aumentan el riesgo a la ocurrencia de desastres naturales (Centro Regional de Información sobre desastres para América Latina y El Caribe, 2012).

La OPS/OMS ha definido este tipo de emergencias como cualquier evento adverso que dé como resultado la alteración normal del medio ambiente, ocasionando un número de víctimas capaz de alterar la atención rutinaria de emergencias.

Entre los peores desastres naturales ocurridos recientemente en el mundo se encuentran: *La Inundación del Río Yangtsé 1911*: Se calcula que cobró cerca de 100.000 víctimas mortales. *Terremoto de Kanto 1923*: La isla japonesa de Honshu sufrió un sismo de magnitud 7,8 en la Escala Richter, el cual afectó varias ciudades, entre éstas, Yokohama, Chiba, Kanagawa, Shizuoka y Tokio. Se estima que el número de víctimas mortales fue de 200.000 aproximadamente. *El Terremoto de México 1985*: Un terremoto de magnitud 8,1 (Mw) golpeó las costas mexicanas del Pacífico. El evento dejó más de 100.000 muertos y daños materiales devastadores para el país (Viveros y Padilla, 31 de Marzo de 2015).

A pesar del gran número de víctimas que han cobrado los desastres naturales en los últimos años y de la tendencia creciente pronosticada durante 50 años de la ocurrencia de dichos desastres (Organización de las Naciones Unidas, 2010) la mayoría de países en vía de desarrollo no cuenta con un plan completo estructurado para dar respuesta inmediata a las emergencias provenientes de desastres naturales.

Colombia se ve afectada por distintas fallas geográficas que la ponen en situación de alta probabilidad de ocurrencia de fenómenos naturales, las cuales nos confirman un proceso de construcción y acumulación de riesgos, que posteriormente con la ocurrencia de los desastres, impiden el bienestar social y afectan el desarrollo del país (Campos, 2012).

Entre los desastres que más han afectado al país se encuentran: *La erupción del Nevado del Ruiz 1985*: A pesar de que el Gobierno colombiano había recibido advertencias desde septiembre

por parte de organismos vulcanológicos, el 13 de noviembre de 1985 hizo erupción el volcán Nevado del Ruiz, que devastó por completo el municipio de Armero, Tolima. Fue la segunda erupción volcánica más mortífera del siglo XX después de la del monte Pelée en 1902. Dejando cerca de 25.000 víctimas fatales. El *deslizamiento de tierra en Villatina 1987* en la ciudad de Medellín, tuvo consecuencias similares a las del sismo de Popayán y la erupción del Nevado del Ruiz. El fenómeno dejó un saldo de 500 muertos, mil 500 heridos, 80 casas destruidas y mil 300 personas damnificadas (Redacción Nacional, 2009).

Como medida para la mitigación del riesgo, se elaboran planes para la atención pre y post-desastre, mediante el estudio de los riesgos y consecuencias, analizando también la infraestructura y recursos disponibles. Sin embargo cuando ocurren desastres, los recursos tienden a verse afectados y así también la infraestructura, lo que afecta directamente cualquier red de alivio debido a la incertidumbre (Lauras, Vargas & Charles, 2014).

Debido a este tipo de situaciones, surge la importancia del desarrollo de la logística humanitaria y de sus herramientas; como la localización de centros de acopio y albergues, así como también una adecuada asignación, transporte y distribución de los recursos, lo cual plantea reto adicional ya que la demanda de tales desastres pueden variar con el tiempo, en función del tipo de materiales (o servicio), o en términos de cantidad; con el fin de dar una pronta respuesta y brindar una adecuada atención a las víctimas del desastre. Rennemo, Ro, Hvattum & Tirado (2014) mencionan que los desastres se caracterizan por la incertidumbre e imprevisibilidad; y por lo tanto, la demanda puede cambiar rápidamente en un entorno de este tipo.

Shafia & Rahmaniani (2013) afirman que el rendimiento de los servicios de emergencia se mide en términos del tiempo de respuesta y el costo total de logística. Por lo tanto, si la demanda no se satisface en un corto tiempo, el cumplimiento del servicio se degradará. Para hacer frente a tal situación, el sistema de respuesta debe ser flexible y desarrollado de manera que tenga en cuenta tanto pérdidas sociales, como pérdidas económicas, para reducir las secuelas de los desastres (Balcik, Beamon & Smilowitz, 2008). Por esto, la ubicación de instalaciones y asignación de recursos se vuelven críticas en la planeación para dar una respuesta eficaz a una emergencia.

Este trabajo pretende desarrollar una herramienta computacional para la localización de albergues y asignación de los mismos a diversos puntos de demanda, para la atención post-desastre, en caso de inundaciones y remoción de masa; en las zonas más vulnerables de Bucaramanga y su área metropolitana, haciendo uso de tres algoritmos heurísticos para dar solución al modelo.

Tabla 1.

Cumplimiento de objetivos del Proyecto

Objetivo	Cumplimiento
Revisar en la literatura los algoritmos heurísticos usados para la solución del problema de localización y asignación de recursos en una situación post desastre.	Capítulo 2.
Identificar los posibles puntos de demanda y albergues para la atención humanitaria, a través de la revisión de los planes locales de emergencia de Bucaramanga y su área metropolitana.	Capítulo 8.
Caracterizar y evaluar las instalaciones propuestas para la ubicación de los albergues, en las zonas más vulnerables de Bucaramanga y su área metropolitana.	Capítulo 9.
Construir la matriz de origen destino para la programación de rutas y asignación de recursos, usando como herramienta Google Maps.	Apéndice I
Desarrollar un modelo matemático para la asignación de los recursos para la población afectada y minimizar el tiempo de viaje entre los puntos de demanda y los albergues, para las zonas más vulnerables de Bucaramanga y su área metropolitana.	Capítulo 10.
Desarrollar una herramienta computacional mediante algoritmos heurísticos para dar solución al problema de asignación de recursos.	Apéndice J
Con base a los resultados obtenidos en la investigación realizada, elaborar un artículo de carácter publicable.	Apéndice K

2. Revisión de la Literatura

Apte (2009) afirma que “La logística humanitaria es un elemento crítico de un proceso de alivio de desastres efectivo. Definimos la logística humanitaria como una rama especial de la logística que gestiona la cadena de suministro para dar respuesta mediante bienes y servicios críticos, con desafíos tales como oleadas de demanda, suministros inciertos, ventanas de tiempo crítico, de cara a vulnerabilidades de la infraestructura y alcance y el tamaño de las operaciones”. Se divide la logística humanitaria en cuatro fases, para las operaciones de pre y post-desastre: El pre-desastre incluye 1) Mitigación y 2) Preparación, y el post-desastre incluye 3) Respuesta, 4) Recuperación (McLoughlin et al. 1985). El propósito de la mitigación es prevenir que los desastres sucedan, mientras que la preparación incluye actividades para dar una respuesta al desastre, por otro lado el objetivo de la fase de respuesta es la gestión eficiente de los recursos para salvar vidas (Celik et al. 2012) y finalmente la fase de recuperación que se encarga de hacer volver el flujo de la cadena de suministro a las condiciones normales.

Debido a los desafíos que presenta el desarrollo de la Logística humanitaria, los cuales vienen ligados a un aumento sostenido de la presencia de desastres naturales (UN/ISDR, ONU et al. 2010), este tema ha adquirido relevancia y sus problemas han sido investigados con mayor profundidad. Entre los desafíos que se presentan a la hora de dar respuesta inmediata a la ocurrencia de un desastre se encuentran la localización de instalaciones y la asignación de los recursos. Estos dos problemas han sido investigados por diversos autores, los cuales han planteado diferentes variantes y técnicas de solución.

En 1963 se realizó una investigación acerca del problema de Localización-Asignación, con el objetivo de decidir dónde localizar las instalaciones para dar respuesta a emergencias, asignar eficientemente los recursos de ayuda a la demanda o personas afectadas desde dichas instalaciones y utilizar de manera efectiva los recursos, recientemente se han seguido estudiando tanto el problema de Localización, como el de Asignación de recursos (Cooper, 1963).

La distribución de última milla es la etapa final de una cadena de ayuda humanitaria; se refiere a la entrega de suministros de socorro de los centros de distribución local a los beneficiarios afectados por los desastres. En el año 2008 Balcik, Beamon, y Smilowitz exponen un estudio, en el que se considera un sistema de distribución de última milla con vehículo, a un centro de distribución local y distribuye suministros de emergencia a un número de lugares de demanda. Las principales decisiones se encuentran en la asignación de los suministros de ayuda a los países menos desarrollados, los lugares de demanda y la determinación de los horarios de entrega, y las rutas para cada vehículo durante todo el horizonte de planificación. Se propone un modelo de programación entera mixta que determina los plazos de entrega de los vehículos y distribuyen equitativamente los recursos, basado en la oferta, la capacidad del vehículo, y las

restricciones de tiempo de entrega, con el objetivo de reducir los costos de transporte y la maximización de beneficios a los receptores de ayuda.

Posteriormente en el año 2010 se desarrolla un modelo de optimización estocástica de dos etapas, para orientar la asignación de presupuesto para adquirir bienes y lugares de socorro, decisiones que normalmente deben realizarse con suficiente antelación a un desastre. La optimización se centra en minimizar el número esperado de bajas, por lo que el modelo incluye las decisiones de primera etapa, para representar la expansión de los recursos tales como almacenes, centros médicos, personal médico y los refugios. Las decisiones de la segunda etapa se refieren a la logística del problema, donde asigna recursos y el despliegue de transporte para rescatar población en necesidad de evacuación de emergencia, suministrar productos necesarios y el transporte de la población desplazada por el desastre (Salmerón & Apte, 2010).

El suministro oportuno de materiales vitales para las áreas más afectadas por los desastres juega un papel crítico en la ayuda de emergencia. El problema está relacionado con la selección de almacenes, el encaminamiento de la flota y la programación, a fin de satisfacer la demanda en la ventana de tiempo estricto.

En el 2011 desarrollan un método sistemático para obtener una solución factible mediante la adición de limitaciones en el problema dual, sucesivamente en iteraciones de viabilidad, y finalmente se presenta una prueba de convergencia del nuevo método y sus propiedades (Han, Guan & Shi, 2011).

Posteriormente se realiza un análisis de la decisión de donde almacenar suministros para un desastre como un huracán o un ataque terrorista, analizando que tener los suministros más cerca al área afectada implica una ventaja y a su vez un riesgo mayor. Teniendo en cuenta estos riesgos, se derivan las ecuaciones para determinar la cantidad óptima de la media y los costos totales esperados asociados con la entrega a un punto de demanda o punto vacío, desde un punto de suministro. Posteriormente se demuestra la aplicabilidad del modelo para seleccionar la mejor ubicación de un único punto de suministro de un conjunto discreto de opciones y cómo puede ser embebido dentro de algoritmos de localización existentes para elegir múltiples puntos de suministro (Campbell & Jones, 2011).

Se utilizan métodos potenciales de control de procesos estadísticos para lograr la equidad en la asignación de recursos para la eliminación de desechos, con el fin de detectar patrones emergentes de recolección de escombros en tiempo real. Utilizando el método de arranque automático propuesto por Hawkins como base, se desarrolla un enfoque de auto-equilibrio para las operaciones de limpieza de escombros y se evalúa su rendimiento utilizando datos de una de huracanes del Atlántico de 2003 (Fetter & Rakes, 2011).

En un marco basado en sistemas de información geográfica que facilita la asignación del equipo en respuesta a los desastres, compuesto por tres subsistemas para facilitar la recogida de

información y la toma de decisiones para la distribución de los equipos. En primer lugar, una aplicación que se ejecuta en dispositivos móviles para la solicitud de recursos en el terreno se desarrolla. En segundo lugar, un repositorio de recursos se implementa con una base de datos que permite la consulta espacial de los recursos con una interfaz gráfica, y por último se presenta un sistema de información geográfica que permite automatizar la toma de decisiones como la equiparación de los recursos y la búsqueda de rutas para la distribución de recursos. Con el marco en su lugar, las operaciones de respuesta a desastres podrían ser más eficientes (Chen, Peña-Mora & Ouyang, 2011).

En el año 2012 los investigadores (Zhang, Li & Liu, 2009) y (Bozorgi-Amiri, Jabalameli, Alinaghian, & Heydari, 2012) hacen uso de algoritmos metaheurísticos para dar solución a los problemas de Localización y Asignación en la logística humanitaria; basados en la premisa de que la asignación de los recursos es Primordial en la atención de un desastre, Zhang, Li y Liu formulan un problema de asignación con recursos múltiples, contemplando posibles desastres secundarios. Por la complejidad del modelo con múltiples recursos y depósitos, se diseña un algoritmo metaheurístico que modifica las soluciones de la programación lineal estableciendo prioridades de preferencia para los lugares donde hay alta probabilidad de que ocurran desastres secundarios. Por otro lado Bozorgi-Amiri, Jabalameli, Alinaghian, y Heydari proponen un modelo formulado como una programación lineal entera mixta para minimizar la suma de los costos de localización, adquisición, transporte, tenencia, y escasez, y la varianza del costo total. El modelo determina la localización de los centros de distribución de ayuda y la asignación de zona afectada a los centros de distribución de socorro. Además, desarrollan un enfoque de solución eficiente basada en la optimización de enjambre de partículas con el fin de resolver el modelo matemático propuesto. Finalmente los resultados computacionales demuestran la viabilidad y eficacia del modelo y el algoritmo propuesto.

Los investigadores Başar, Çatay & Ünlüyurt (2012) presentan un marco taxonómico para el problema de localización de estaciones de servicio de emergencia, usando una perspectiva de investigación de operaciones. En este marco, se considera fundamentalmente el tipo de emergencia, la función objetivo, restricciones, supuestos del modelo, modelado y técnicas de solución. También se analizan una variedad de trabajos relacionados con la literatura con el fin de demostrar la eficacia de la taxonomía y obtener una amplia perspectiva de posibles líneas de investigación.

En su trabajo (Aman, Bakhtiar, Hanum & Supriyo, 2012) presentan un análisis basado en dos modelos cuyas perspectivas van enfocadas a minimizar la escasez de la demanda y minimizar el costo de penalización por desatender la demanda, respectivamente. Inicialmente se atiende el problema de la distribución en las áreas afectadas y los centros de distribución, y luego se realiza la asignación de la mano de obra humanitaria para la atención de desastres y recuperación. Los resultados, muestran la aplicabilidad del modelo para el problema de distribución y asignación además de ofrecer flexibilidad para el abordaje del problema.

En el año 2013 se encontraron 3 investigaciones del problema Localización-Asignación, una es la realizada por (Bozorgi-Amiri, Jabalameli & Mirzapour, 2013), en la cual desarrollan un enfoque de programación robusto estocástico multi-objetivo para la logística de socorro en situaciones de incertidumbre. En este enfoque, no sólo las demandas, sino también los suministros y el costo de adquisición y transporte, son considerados como los parámetros inciertos. Por otra parte, el modelo considera la incertidumbre de los lugares en los que pueden surgir esas demandas y la posibilidad de que algunos de los suministros pre-posicionados en el centro de distribución de socorro o distribución, podrían estar parcialmente afectados por el desastre. Finalmente se presenta un caso de estudio del enfoque de optimización robusta estocástico para la planificación de desastres para los escenarios de terremotos en una región de Irán. Los resultados muestran que el modelo propuesto puede ayudar en la toma de decisiones tanto en ubicación de las instalaciones y la asignación de recursos en los casos de las tareas de socorro.

En su segunda investigación Altay desarrolla un modelo basado en la necesidad urgente de asignación eficiente y eficaz de los recursos en la atención de desastres. El trabajo consiste en un modelo de programación entera para múltiples recursos y múltiples ubicaciones, basado en las capacidades y en una lista nacional de inventario de recursos con el fin de asignar personal, instalaciones, suministros y equipos que permitan impactar positivamente en la atención del desastre (Altay, 2013).

Finalmente un análisis interesante presentan (Holguín-Veras, Pérez, Jaller, Van Wassenhove, & Aros-Vera, 2013) donde la función objetivo va enfocada a la reducción de costes sociales y de transporte, llamando costes sociales a la valoración económica del sufrimiento humano asociado con la falta de acceso a un bien o servicio. Es preciso aclarar que la estimación de estos costos de privación se realiza mediante el análisis de la filosofía y la literatura económica, con el fin de obtener los fundamentos adecuados para ello.

La ineficiencia y la desigualdad son dos desafíos que afectan a las operaciones humanitarias y de prestación de salud en regiones con recursos limitados. En el año 2014 desarrollan un modelo usando una familia de la función de la equidad, con el fin de cuantificar la eficiencia y equidad. Posteriormente presentan las asignaciones de recursos óptimos dentro de cada objetivo proporcionalmente de forma justa (McCoy & Lee, 2014).

Salman & Gül (2014) proponen determinar el tamaño y la ubicación de las instalaciones de servicios de emergencias con un modelo de múltiples periodos de programación entera mixta, cuyos objetivos son reducir al mínimo el recorrido total, el tiempo de espera de las bajas durante la búsqueda y rescate y el costo total del establecimiento de nuevas instalaciones. El modelo minimiza la suma ponderada de estos objetivos sujetos a la disponibilidad de vehículos y capacidad de servicio en las instalaciones nuevas y existentes en cada periodo.

Se propone un modelo multi objetivo que determina la ubicación de los centros de distribución de ayuda humanitaria y la respectiva asignación de las zonas afectadas a los centros. Para la solución, se implementa un algoritmo genético encontrando soluciones relativamente buenas en tiempo razonable (Barzinpour, Saffarian, Makoui & Teimoury, 2014).

Inspirados en el estudio de un caso real de un distrito de Irán, se propone un modelo que considera tanto los objetivos humanitarios como los costos, basados en un enfoque de metas de programación. En su trabajo, se utiliza la evaluación de riesgo sísmico como una entrada, con el fin de realizar la asignación de las personas afectadas en las instalaciones de manejo de emergencias que deben establecerse (Barzinpour & Esmaeili, 2014).

Una solución al problema de asignación se da mediante la correlación de la investigación en la toma de decisiones y el análisis estadístico, y luego se prueba la aplicabilidad y se evalúan las ventajas en un caso de estudio en china después del supertifón Saomai (Zhan, Liu, & Ye, 2014).

Una de las problemáticas más llamativas en situaciones de desastre es el descontento social por la ineficiente distribución de las ayudas. Motivados por esta problemática se presenta un modelo para la integración de los intereses de las partes involucradas utilizando el método TOPSIS para crear una jerarquía en los puntos de demanda, para los parámetros cualitativos y cuantitativos, y por último se propone un algoritmo de descomposición resolver la asignación de flota (Das & Hanaoka, 2014).

Muchas veces en las situaciones de emergencia, la demanda de recursos o ayudas es muy superior a la oferta de las mismas, por lo cual surge la necesidad de planificar la asignación de los recursos de la mejor forma. Las ambulancias particularmente son uno de los recursos más escasos en situaciones de desastre, por lo cual es muy importante asignar su uso eficientemente. Debido a la incertidumbre que se presenta al momento de dar respuesta a un desastre natural en el año 2015 Talarico y Meisel (2015), al igual que Bozorgi-Amiri, Jabalameli y Mirzapour lo hicieron en el año 2012, proponen dos fórmulas matemáticas con el fin de obtener planes de viaje que minimizan la última hora de finalización del servicio entre las personas en espera de ayuda. También se propone una metaheurística de búsqueda local, para hacer frente a la dinámica de incertidumbres en situaciones de desastres, y también para entregar soluciones de calidad en tiempos cortos, lo cual cumple con los criterios de aplicabilidad en una situación de desastre.

En 2015 se estudia el problema de Localización-Asignación de almacenes posteriormente a la ocurrencia de un desastre natural, para determinar el lugar, el número y el tamaño de dichos almacenes, para asignarles a estos de manera eficiente los suministros. Para el desarrollo del modelo plantean un programa estocástico con múltiples escenarios (Florez, Lauras, Okongwu & Dupont, 2015).

En el mismo año el grupo de investigadores realizan un estudio de las técnicas utilizadas por diversos autores para dar respuesta al problema de Localización-Asignación en la logística humanitaria. Hoyos, Morales & Tabatabaei (2015) Llegan a la conclusión que los modelos que involucran Programación Entera Mixta MIP y Programación Estocástica son muy utilizadas, así como soluciones con Algoritmos Heurísticos, como el algoritmo genético. Debido a la gran importancia que representa el tiempo computacional demandado para dar solución a estos problemas Schryen, Rauchecker & Comes (2015) rectifican la utilidad del numeroso uso de técnicas heurísticas observado en la investigación de Hoyos, demostrando la utilidad de los métodos heurísticos para dar una buena solución a los problemas de Asignación de Recursos de logística humanitaria, en un corto tiempo. Por esto, otros autores estudian los problemas de localización de refugios, centros médicos y transporte de vehículos, cuando ocurre un desastre natural. Para la solución rápida y eficiente de dichos problemas se propone un modelo de programación integrado y para la solución de dicho problema se establece el método heurístico de Relajación Lagrangian o *Lagrangian Relaxation method*, con el fin de minimizar el costo total de respuesta, ya que este es usado para problemas a gran escala (Zhen, Wang & Liu, 2015). En el mismo año se proponen cuatro metaheurísticas: Algoritmo genético, Búsqueda Tabú, Enjambre de Partículas de Optimización y Búsqueda dispersa, para dar solución al problema de localización de instalaciones, seguido de la ocurrencia de un desastre natural (Basu, Sharma & Sarathi, 2015).

Se desarrolla un modelo de riesgo p -Centro o *p-Center risk* para hacer frente al problema de localización en la fase de pre-desastre natural. El objetivo del modelo es minimizar el riesgo de no satisfacer la demanda. Para dar solución al modelo este es linealizado y resuelto como un programa lineal integrado (Akgün, Gümüşbuğa & Tansel, 2015).

Para el problema de localización se plantean dos modelos, el primero es un modelo determinista que incorpora la distancia entre los centros de respuesta y los centros de las poblaciones. El segundo es un modelo de programación estocástica, se llega a la conclusión que este último es el más eficiente, ya que reduce significativamente el costo esperado de asignación de suministros. Para la solución se utiliza el algoritmo de Bender, que se ha encontrado muy eficaz en la solución (Verma & Gaukler, 2015).

El problema de localización de centros logísticos, sirve como herramienta para facilitar la respuesta a la ocurrencia de algún desastre natural, para lo cual aplican un proceso de jerarquía analítica (AHP), para establecer comparaciones por pares para las alternativas. Para la toma de decisiones se utilizan dos métodos: Programación de metas lexicográficas (LGP) y programación de metas logarítmica de dos pases (TLGP) (Amiri & Asvadi, 2015).

En el año 2016 se utiliza un modelo de red de tres escalones para integrar los problemas de asignación de recursos y distribución, para la fase de pre-desastre. El objetivo del modelo es minimizar el coste social, que es la suma de costes logísticos y costes de privación. Concluyen que tener en cuenta múltiples Puntos de Suministro ayuda a disminuir la demanda insatisfecha y

asegura una distribución efectiva de los recursos (Pradhananga, Mutlu, Pokharel, Holguín & Seth, 2016).

En el mismo año se aborda el problema de Asignación de suministros de emergencia, teniendo en cuenta la incertidumbre de las condiciones de oferta, demanda y disponibilidad de la ruta (Bai, 2016), al igual que lo hicieron los autores Talarico y Meisel (2015), y el grupo de investigadores: Bozorgi-Amiri, Jabalameli y Mirzapour en el año 2013. Para lo que utiliza un modelo de optimización multi objetivo: Minimizar tiempo de demanda insatisfecha y el costo total. Para dar solución al modelo, se adopta el método de Programación por metas o *Goal Programming*, para integrar los dos objetivos y convertir el problema multiobjetivo a un problema con un único objetivo, permitiendo dar prioridad al objetivo principal.

Buscando solucionar el problema de Localización-Asignación y distribución eficiente de recursos perecederos, los cuales tienen una duración limitada, para esto se basan en la programación estocástica robusta. Su objetivo es minimizar tiempos de respuesta y el coste total, penalizando la demanda insatisfecha. Su método de solución es el procedimiento Tchebycheff nivel de reservas o *The reservation level Tchebycheff procedure (RLTP)* (Malek, Moghaddam, Zahiri & Amiri, 2016).

Tratando el problema de Localización mediante el método de relajación de Lagrange, el cual trata de encontrar un límite inferior adecuado al problema. Se propone un modelo de redes de alivio basado en el cubrimiento de los problemas de localización de instalaciones para acelerar la capacidad de respuesta en las operaciones de socorro (Hasanzadeh & Bashiri, 2016).

En el año 2016 se analizaron 4 investigaciones en las cuales los autores hicieron uso de algoritmos metaheurísticos para la solución a problemas de Localización y Asignación, por ejemplo: Paul & MacDonald (2016) se basan en la programación estocástica para la solución del problema Localización-Asignación en los centros de reservas, para mejorar la preparación en caso de que ocurra un desastre repentino. Para observar la aplicación de esta solución se utiliza como ejemplo un caso específico de desastre: Terremotos en la región de Northridge de California EEUU. Dada la complejidad computacional del problema de interés, para dar solución al problema se utiliza una Heurística de Optimización Evolutiva o *Evolutionary Optimization Heuristic* con la ayuda de una programación innovadora entera mixta modelo que genera soluciones de alta calidad en tiempo eficiente.

Al igual que Moreno, Alem & Ferreira (2016) abordan el problema de Localización-Transporte en emergencias logísticas, teniendo en cuenta que los vehículos pueden ser reutilizados en un mismo periodo de tiempo para mejorar el nivel de servicio, para esto se desarrollan dos modelos de programación entera mixta estocásticos, y se utilizan como método de solución dos Heurísticas: Heurística de Relajación-y-Fijación o *Relax-and-fix Heuristic*, y la Heurística de Fijación-y-optimización o *Fix-and-optimize Heuristic*. Se concluye que el tener en

cuenta múltiples periodos para la toma de decisiones y la opción de reutilizar los vehículos disminuyen los costos totales, haciendo más eficientes las operaciones de socorro.

Se desarrolla un modelo de optimización estocástica para dar solución al problema de Localización-Asignación de suministros médicos, para el momento en que ocurren desastres naturales como huracanes. Se desarrolla una Metaheurística Evolutiva de optimización, que produce soluciones de alta calidad, para la resolución de problemas a gran escala. El objetivo general es determinar el número, la ubicación y la capacidad de centros de almacenamiento temporales, con el fin de minimizar los costos totales; que incluyen costos sociales, teniendo en cuenta un presupuesto limitado (MacDonald & Paul, 2016).

Por último el problema de localización-asignación-distribución es tratado con el objetivo de minimizar los costos totales de la cadena de socorro y maximizar el nivel de satisfacción de las personas en las zonas afectadas, mediante la aplicación de una sanción a la escasez de suministros de socorro. Se hace uso de métodos heurísticos para encontrar una buena solución al problema de Programación Lineal Entera Mixta (*MILP*) (Amiri & Sadjads, 2016).

Se aborda el problema de localización-Ruteo desde la programación estocástica, teniendo una función multiobjetivo: Minimizar cantidad máxima de escasez en zonas afectadas, minimizar el tiempo total de viaje y los costos totales en el pre y post-desastre. El modelo se resuelve como un problema de programación lineal con un único objetivo aplicando el método ε -Restricción o ε -*Constraint method* (Bozorgi, 2016).

Se desarrolla un modelo de programación estocástica para las operaciones de alivio en los desastres naturales, para el problema de ubicación de depósitos intermedios y transporte de suministros (Rath, Gendreau & Gutjahr, 2016).

Finalmente tratan el problema de localización-asignación para la cadena de suministro de sangre en múltiples periodos, con el objetivo principal de minimizar los costos de la cadena de suministro, teniendo en cuenta el costo por demora en la satisfacción de la demanda. Para la solución del problema se utiliza un enfoque estocástico robusto, debido a la incertidumbre se propone también un modelo P-Robusto o *P-Robuster*, para considerar ocurrencias inesperadas (Fereiduni & Shahanaghi, 2016).

Se observa durante el análisis de las diferentes investigaciones que un gran número de autores como: Aman, Bakhtiar, Hanum & Supriyo (2013), Holguín-Veras, Pérez, Jaller, Van Wassenhove, & Aros-Vera (2013), Salman & Gül (2014), Barzinpour & Esmaeili (2014), Pradhananga, Mutlu, Pokharel, Holguín & Seth (2016), Bai (2016), Malek, Moghaddam, Zahiri & Amiri (2016), Fereiduni & Shahanaghi (2016); consideran como uno de los factores más relevantes satisfacer la demanda de la población afectada, debido a que en la gran mayoría de escenarios esta se encuentra en situación de alto riesgo; razón por la cual proponen en la función objetivo de su modelo matemático un costo de penalización por desatención de la demanda.

3. Planteamiento del Problema

Afirman el Banco Mundial Colombia y Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (2012) que al igual que en muchos países de América Latina existen vacíos en cuanto a la planeación de la gestión del riesgo. Los avances conceptuales sobre la relación entre gestión del riesgo y desarrollo, no han podido ser llevados a nivel de políticas de Estado, ni han sido incorporados como parte integral de gestión pública, contribuyendo así al crecimiento del riesgo.

Al problema anterior se debe sumar que Colombia Se localiza en la esquina noroccidental de Suramérica, el 35% del territorio está ubicado en la Cordillera de los Andes, resultado de una larga evolución durante la cual placas tectónicas chocan entre sí, lo que da origen a un complejo sistema montañoso que recorre el país de sur a norte, y que se manifiesta en una importante actividad sísmica y volcánica (Banco mundial Colombia, 2012) , lo cual representa un riesgo permanente, que afecta el desarrollo social y económico del país.

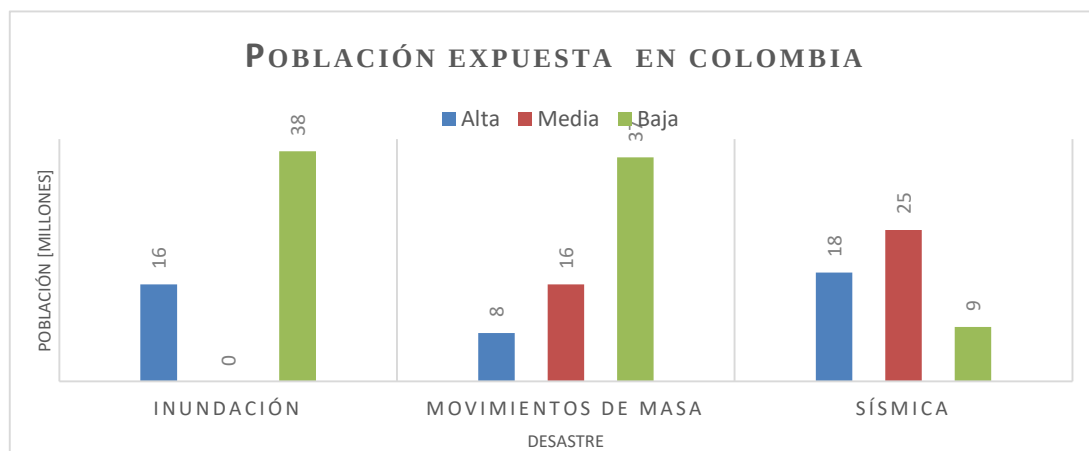


Figura 1. Población expuesta a movimientos de masa, sismos e inundaciones en Colombia. Adaptada de: Corporación OSSO-EAFIT, 2011

Como se observa en la gráfica 16 millones de personas se encuentran viviendo con un grado alto de riesgo de inundación, 8 millones se encuentran en un riesgo alto de que ocurra un deslizamiento de masa y 18 millones se encuentran altamente propensos a que ocurran sismos (Principalmente en las regiones Andina y Pacífica).

A pesar de la situación de riesgo de la nación, aún el número de investigaciones acerca del tema de logística humanitaria es muy pobre, y por tanto igualmente, las herramientas que

contribuyen a mejorar la gestión del riesgo, como algoritmos de programación matemática y simulación de desastres.

La ciudad de Bucaramanga es considerada como una región de alta amenaza sísmica, donde confluye el movimiento de las placas tectónicas de la cordillera oriental que la hacen más propensa a fenómenos de origen geológico. El Nido Sísmico que afecta a Bucaramanga se encuentra localizado a unos 35 Km al sur de la ciudad, en el área de la Mesa de los Santos a una profundidad de 160 Km, donde chocan la placa tectónica de Nazca (pacifico desplazamiento de 60 a 70 mm al año), la placa Continental de Suramérica (desplazamiento de 15 a 20 mm al año) y la placa del Caribe (desplazamiento de 20 a 25 mm al año), las cuales afectan con su activación continua de Micro-temblores y temblores de baja intensidad el área del Municipio de Bucaramanga. Los antecedentes geológicos permiten hacer un estimativo cercano a magnitudes entre 6.7 y 7.1 en la escala de Richter, definiendo el nivel de riesgo sísmico para la zona de la ciudad de Bucaramanga, donde se destacan 4 fallas reales y una inferida las cuales se distribuyen a lo largo del territorio (Comité Local de Prevención y Atención de Desastres, 2011).

Considerando la situación de alto riesgo en la que se encuentra la región, sumando a leyes existentes como la Ley No 1523 de gestión del riesgo de desastres (2012) establece que “Las autoridades departamentales, distritales y municipales deben formular y concertar con sus respectivos consejos de gestión del riesgo, un plan de gestión del riesgo de desastres y una estrategia para la respuesta a emergencias de su respectiva jurisdicción.” Este plan se encuentra aún en proceso de construcción (Plan Municipal de Gestión del Riesgo y la elaboración de la estrategia para la respuesta a emergencias), lo que evidencia una gran falla en la planeación estratégica para dar respuesta inmediata a la ocurrencia de desastres naturales, y falta de información y herramientas para determinar la ubicación de instalaciones (Puntos de suministro, puntos de distribución y albergues) y para la asignación de los recursos a dichas instalaciones.

Este proyecto consiste en diseñar y desarrollar una herramienta computacional que facilite la localización de instalaciones y la asignación de recursos, para disminuir el tiempo de respuesta a la ocurrencia de desastres naturales de tipo inundaciones y remoción de masa y los costes totales (Entendiendo costes totales como la suma de los costos logísticos y los costos sociales), asegurando que toda la población afectada reciba los recursos necesarios de supervivencia. El proyecto consta de varias etapas:

- 1) Construcción de la matriz de origen destino para la programación de rutas y asignación de recursos, entre los puntos de demanda y los albergues usando como herramienta Google Maps.

- 2) Desarrollo de un modelo matemático para la asignación de los recursos, teniendo como objetivo minimizar el tiempo de servicio a la población afectada, para las zonas más vulnerables de Bucaramanga y su área metropolitana.

3) Desarrollo de una herramienta de implementación mediante tres algoritmos heurísticos (Algoritmo heurístico basado en Prim, Algoritmo basado en el método heurístico de Ardalan y Algoritmo heurístico de Kruskal).

4) Análisis de resultados y validación de los tres algoritmos utilizados para la solución del problema de Localización-Asignación en Logística Humanitaria.

4. Marco de Antecedentes

4.1.Trabajo 1

En el trabajo de grado titulado Localización de instalaciones y ruteo de personal especializado en logística humanitaria post-desastre - caso inundaciones, un enfoque para determinar propuestas de solución para el problema de localización de un punto de distribución y múltiples albergues considerando el riesgo de inundación asociado a la zona, además del problema de ruteo del personal especializado que permita aliviar las calamidades médicas y psicológicas entre otras presentes en la población afectada en una situación post-desastre. Dichos propuestas consideran la aplicación de investigación de operaciones como herramienta de solución. El objetivo principal de este trabajo es proporcionar un modelo funcional para diseñar de manera estratégica la red instalaciones, además coordinar el suministro de servicios requeridos por la población en el menor tiempo posible (Reyes y Quintero, 2015).

En el trabajo se proponen tres alternativas de solución para el problema de localización de instalaciones, asignación y ruteo de las unidades móviles, en situación post-desastre causada por una inundación repentina. La primera propuesta consiste en la definición un modelo jerárquico que se ejecuta secuencialmente, en la primera etapa se ejecuta el modelo de localización y en la segunda se ejecuta el modelo de asignación y ruteo de unidades móviles. La segunda propuesta consiste en un modelo integral, el cual define la ubicación del punto de distribución, la asignación y ruteo de las unidades móviles; la ubicación de los albergues y la demanda de éstos, son un parámetro de entrada para el modelo integral. La tercera propuesta consiste en un modelo *location-allocation-routing*, el cual determina la localización de los albergues y del punto de distribución, además asigna y define las rutas para las unidades móviles.

La modelación matemática de la situación post-inundación se basó en el *Vehicle Routing Problem* y en el *Facility Location Problem*, con algunas adecuaciones con el fin de que se ajustaran a la situación post-inundación. Los modelos son diseñados para ser considerados herramientas de apoyo en la toma de decisiones, en los cuales se busca que el tiempo de

operación sea el menor tiempo posible, considerando el porcentaje de alivio de la población afectada como medida de desempeño de dichos modelos propuestos. Se toma como caso de estudio la inundación que sufrió el municipio de Santa Lucía en el departamento del Atlántico, Colombia en 2010.

4.2.Trabajo 2

Se desarrolla un proyecto que lleva como título “Un algoritmo memético para el problema de localización-ruteo con ventanas de tiempo para la atención de desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga”, el cual consiste en una investigación donde se aborda un problema de localización de instalaciones (albergues) y un problema de ruteo de vehículos, de manera conjunta, para llevar a cabo operaciones de atención y evacuación de afectados en caso de un desastre sísmico en la ciudad de Bucaramanga. El objetivo principal del LRPTW es ubicar los albergues a ser utilizados, asignar puntos de encuentro (personas) a estos, y crear rutas de evacuación que cumplan con la restricción de ventanas de tiempo de los puntos de encuentro. Las ventanas de tiempo en este problema se usan para priorizar a algunos clientes y limitar el horizonte de planeación a un tiempo razonable de respuesta final. Desde la perspectiva de la optimización, el LRP es un problema de optimización combinatoria catalogado de tipo NP-Hard debido a su complejidad computacional. Se dio solución al LRPTW mediante un algoritmo memético que es propuesto para minimizar el tiempo total de evacuación de las zonas más vulnerables de la ciudad (Barreto y Niño, 2016).

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

4.3.Trabajo 3

Se consideran en el trabajo de grado titulado “Desarrollo de un algoritmo híbrido para resolver el problema de localización-ruteo”, un LRP estático con flota de vehículos homogénea en el que se busca establecer los depósitos que se deben abrir, la asignación de clientes a cada depósito y la construcción de las rutas de distribución para satisfacer la demanda de los clientes. Así, el objetivo principal planteado en este aporte, es el desarrollo de un algoritmo para la solución del problema de localización-ruteo, con múltiples depósitos con limitaciones de

capacidad y un vehículo por depósito, utilizando el método de optimización colonia de hormigas (ACO) y la búsqueda local iterativa (ILS) (Nier y Niño, 2015).

De esta manera, en este documento se presenta un aporte valioso en el estudio de los métodos de solución que han sido utilizados en el LRP, para el desarrollo de un algoritmo aplicado a l problema con múltiples almacenes con limitaciones de capacidad y un vehículo por depósito. Finalmente se evidencia un mayor rendimiento del algoritmo híbrido que se propone, frente al algoritmo ACO tradicional con respuestas que disminuyen el costo promedio sin aumentar considerablemente el tiempo computacional.

5. Justificación del Problema

Cada año los desastres naturales o provocados por el hombre aumentan significativamente, y con ellos el número de personas afectadas y pérdida de vidas; durante el periodo comprendido entre 1975 y 2005 el número de desastres naturales en todo el mundo mostró una tendencia creciente, y se pronosticó una prolongación del crecimiento durante 50 años más (ONU, 2010); razón por la cual, los gobiernos y organizaciones humanitarias se encuentran buscando la manera de tener un plan para ofrecer ayuda de una forma más eficiente, en el momento en el que ocurra cualquier tipo de desastre. Colombia además de ser un país propenso a desastres causados por el hombre por factores como: La explotación inadecuada de recursos naturales, el desplazamiento de población a zonas urbanas y el uso acelerado del suelo, se presentan gran número de fallas; en el caso concreto de Bucaramanga, la ciudad es considerada como una región de alta amenaza sísmica, donde confluyen el movimiento de las placas tectónicas de la cordillera oriental, que la hacen más propensa a fenómenos de origen geológico, como deslizamientos e inundaciones, razón por la cual la ciudad ha sido gravemente afectada (CLOPAD, 2011). A esto se le suma que “En Colombia no existe una política nacional de gestión del riesgo de desastres, razón por la cual las acciones del Estado en esa materia han sido direccionadas por instrumentos de planeación como el Plan Nacional de Prevención y Atención de Desastres (PNPAD) y algunos Documentos Conpes. Sin embargo, las directrices y contenidos de estos instrumentos han alcanzado bajos niveles de implementación.” (Banco Mundial y Fondo Mundial para la Reducción y Recuperación de Desastres, 2012).

Los indicadores anteriores establecen como imperativo que en todas las ciudades del mundo se cuente con mecanismos de atención rápida y eficiente ante cualquier desastre, razón por la cual la Logística Humanitaria tiene gran importancia; ya que sirve como herramienta para la planeación, ejecución y control de los recursos y servicios de la cadena logística de ayuda humanitaria, desde los proveedores donantes, hasta que dichos recursos llegan a manos de las personas afectadas, para suplir sus necesidades de supervivencia y aliviar su sufrimiento.

Existen tres tipos de decisiones que se deben tomar en la Logística humanitaria según su alcance en el tiempo: Decisiones Operativas, Tácticas y Estratégicas. Los problemas que deben ser solucionados mediante decisiones estratégicas (Como las que abordará este proyecto) son denominados NP-duros; como el diseño de la red logística, es decir, la localización de Centros Logísticos, Puntos de Distribución y albergues; así como la determinación de su capacidad y cantidad; la solución de estos problemas implica un gran esfuerzo computacional, y por tanto, la demanda del tiempo de solución aumenta exponencialmente de acuerdo al tamaño del problema. En este punto es indispensable recordar que el Tiempo es una variable crítica a tener en cuenta al formular la solución de estos problemas; debido a que la realidad puede cambiar rápidamente, exigiendo buenas soluciones en tiempo real. Razón por la cual, se recomienda el uso de Métodos Heurísticos para la resolución de los mismos (Glover & Kochenberger, 2003).

6. Objetivos

6.1. Objetivo general

Desarrollar la red de instalaciones para la programación de las rutas y asignación de recursos para la atención post-desastre de inundaciones y remoción de masa; en las zonas más vulnerables de Bucaramanga y su área metropolitana, usando un algoritmo heurístico.

6.2. Objetivos específicos

- Revisar en la literatura los algoritmos heurísticos usados para la solución del problema de localización y asignación de recursos en una situación post desastre.
- Identificar los posibles puntos de demanda y albergues para la atención humanitaria, a través de la revisión de los planes locales de emergencia de Bucaramanga y su área metropolitana.
- Caracterizar y evaluar las instalaciones propuestas para la ubicación de los albergues, en las zonas más vulnerables de Bucaramanga y su área metropolitana.
- Construir la matriz de origen destino para la programación de rutas y asignación de recursos, usando como herramienta Google Maps.

- Desarrollar un modelo matemático para la asignación de los recursos para la población afectada y minimizar el tiempo de viaje entre los puntos de demanda y los albergues, para las zonas más vulnerables de Bucaramanga y su área metropolitana.
- Desarrollar una herramienta computacional mediante algoritmos heurísticos para dar solución al problema de asignación de recursos.
- Con base a los resultados obtenidos en la investigación realizada, elaborar un artículo de carácter publicable.

7. Marco Teórico

7.1. Logística

La logística la define Langley (2013) como “La parte de los procesos de la cadena de suministro que planifica, implementa y controla el flujo y almacenamiento eficiente y efectivo de bienes y servicios y la información relacionada, desde el punto de origen hasta el consumo, con la finalidad de satisfacer los requerimientos del cliente”, Primordial en las ciencias militares, administración y demás disciplinas enfocadas en el diseño, suministro y conservación de recursos.

La razón de ser de la logística, parte del problema de encontrar la mejor manera de llevar los bienes o recursos al cliente o consumidor final, comprendiendo los esfuerzos necesarios, como la rapidez de la entrega, el costo de transporte y la flexibilidad que se hace necesaria para poder responder a cualquier eventualidad o cambio.

7.1.1. Logística humanitaria.

La logística humanitaria se define según Thomas (2005) como “El proceso de planificación, ejecución y control eficiente del flujo de costos y el almacenamiento de los bienes y materiales, así como la información relacionada, desde el punto de origen al punto de consumo, con el propósito de cumplir con los requisitos del beneficiario final”. Por esto se considera fundamental la aplicación de conocimientos y habilidades, así como también la movilización de recursos para realizar una atención rápida y efectiva a la población afectada.

Es evidente el interés que ha ganado en la literatura la logística humanitaria, pues es notorio y significativo el aumento de las investigaciones relacionadas con este tema en los últimos años, y

se puede atribuir este esfuerzo a la complejidad y dinamismo de las cadenas humanitarias de suministro. Los modelos de toma de decisiones pueden resultar bastante útiles para las organizaciones humanitarias, para mejorar su estrategia para la planificación, la gestión de sus operaciones para el posicionamiento previo, el almacenamiento y la distribución, y sostener la ayuda durante y después de una crisis(Safeer, 2014).

7.1.2. Desastres.

Un desastre es un evento, generalmente repentino e imprevisto, que ocasiona daños, pérdidas y paralización temporal de actividades en cierta área y afecta a una parte importante de la población. De acuerdo con el fenómeno que los originan, los desastres pueden clasificarse en dos grandes grupos: los que son provocados por fenómenos naturales y los que se derivan de actividades humanas. Los principales efectos Primarios de los desastres son: la pérdida de vidas y lesiones en la población, la pérdida de bienes, el daño e interrupción de los servicios básicos, los daños en la infraestructura, la desorganización social y física de la comunidad, y las alteraciones orgánicas y conductuales de las personas (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2005).

Está claro que las consecuencias de un desastre son alarmantes y requieren de un gran cuidado, pues con la debida preparación para estos eventos adversos, se puede mitigar el impacto de los mismos. Por esta razón, las organizaciones mundiales se han dado a la tarea de buscar mecanismos y métodos que permitan dar un manejo adecuado a los desastres.

7.1.3. Gestión de desastres.

La federación internacional de sociedades de la cruz roja y de la media luna roja, define la gestión de desastres como la organización y la gestión de recursos y responsabilidades para abordar todos los aspectos humanitarios de las emergencias, en particular la preparación, la respuesta y la recuperación a los desastres, a fin de reducir sus efectos.

Varios países del mundo han visto la importancia de establecer normas que permitan garantizar una adecuada gestión de los desastres. En Colombia mediante la Ley 1523 del Congreso de la República (2012), “Se adopta la política Nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres SNGRD, donde se orienta a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo, y para el manejo de desastres; con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible”.

Proceso de la gestión del riesgo de desastres.

La gestión del riesgo de desastres está compuesta por los procesos de estimación de riesgo, prevención y educación del riesgo, preparación, respuesta y rehabilitación y por último el proceso de reconstrucción, los cuales garantizan una adecuada preparación para el desastre, y así mismo la mitigación de las consecuencias que se presentan en un evento adverso (Ulloa, 2011).

Estimación del riesgo.

Este proceso permite la identificación y valoración del riesgo, para poder tener una visión de la exposición que un determinado grupo social pueda tener al mismo.

Prevención y reducción del riesgo.

Hace referencia a las acciones que evitan la generación de nuevos riesgos y que reducen la vulnerabilidad y riesgos en el contexto de la gestión del desarrollo sostenible (SNGRD, 2011).

Preparación, respuesta y rehabilitación.

En este proceso se realizan acciones con el fin de procurar una óptima respuesta de la sociedad ante un desastre, permitiendo una oportuna y adecuada atención a los afectados y la rehabilitación de los servicios básicos indispensables, para así normalizar las actividades en la zona afectada. (Ley no 29664, 2011)

Reconstrucción.

Este proceso está compuesto por todas aquellas actividades que se ejecutan con el fin de establecer condiciones sostenibles de desarrollo en las áreas afectadas, reduciendo el riesgo anterior y garantizando la recuperación física económica y social de las comunidades afectadas. (Ley no 29664, 2011)

7.2. Investigación de operaciones

En la literatura se pueden encontrar una gran cantidad de definiciones de lo que es la investigación de operaciones, y es que es tan amplio el concepto que se incluyen diferentes perspectivas para definir la investigación de operaciones.

La Investigación de operaciones “Es la aplicación del método científico por equipos interdisciplinarios a problemas que comprenden el control y gestión de sistemas organizados (hombre - máquina); con el objetivo de encontrar soluciones que sirvan mejor a los propósitos del sistema (u organización) como un todo, enmarcados en procesos de toma de decisiones (Frederick, 1997).

Las primeras actividades formales de investigación de operaciones se iniciaron en Inglaterra durante la Segunda Guerra Mundial, cuando un equipo de científicos empezó a tomar decisiones con respecto a la mejor utilización del material bélico (Taha, 2012). Sin embargo, la investigación de operaciones resulta aplicable a distintos tipos de industria e incluso, en la logística humanitaria.

7.2.1. Fases de un estudio de investigación de operaciones.

Los estudios de investigación de operaciones se basan en la labor de equipo, donde los analistas de investigación de operaciones y el cliente trabajan codo con codo. Como herramienta de toma de decisiones, la investigación de operaciones es tanto una ciencia como un arte. Es una ciencia por las técnicas matemáticas que incorpora, y un arte, porque el éxito de las fases que conducen a la solución del modelo matemático depende en gran medida de la creatividad y experiencia del equipo de investigación de operaciones. (Taha, 2012).

Resulta bastante complejo definir un curso de acción para la implementación de estos distintos factores, sin embargo se puede decir que para implementar la investigación de operaciones en la práctica, las fases principales son:

7.2.1.1. Definición del problema.

Implica definir el alcance del problema investigado. El objetivo es identificar tres elementos principales del problema de decisión:

- Descripción de las alternativas de decisión
- Determinación del objetivo del estudio
- Especificación de las limitaciones bajo las cuales funciona el sistema modelado

7.2.1.2. Construcción del modelo.

Implica un intento de transformar la definición del problema en relaciones matemáticas. Si el modelo resultante se ajusta a uno de los modelos matemáticos estándar, como la programación lineal, se suele obtener una solución utilizando los algoritmos disponibles. Por otra parte, si las relaciones matemáticas son demasiado complejas como para permitir la determinación de una solución analítica, se puede optar por simplificar el modelo y utilizar un método heurístico, o

bien considerar la simulación, si es lo apropiado. En algunos casos, una simulación matemática puede combinarse con modelos heurísticos para resolver el problema de decisión.

7.2.1.3.Solución del modelo.

Implica el uso de algoritmos de optimización bien definidos. Un aspecto importante de la fase de solución del modelo es el análisis de sensibilidad. Tiene que ver con la obtención de información adicional sobre el comportamiento de la solución óptima cuando el modelo experimenta algunos cambios de parámetros. El análisis de sensibilidad es particularmente necesario cuando no se pueden estimar con precisión los parámetros del modelo. En estos casos es importante estudiar el comportamiento de la solución óptima en el entorno de los parámetros estimados.

7.2.1.4.Validación del modelo.

Comprueba si el modelo propuesto hace en realidad lo que dice que hace. La validez de un modelo es comparar su resultado con resultados históricos. El modelo es válido si, en condiciones de datos de entrada iguales, reproduce de forma razonable el desempeño pasado. Sin embargo, no suele haber seguridad de que el desempeño futuro continuará copiando el comportamiento pasado. Además, como el modelo se basa en el examen cuidadoso de datos pasados, la comparación propuesta casi siempre es favorable. Si el modelo propuesto representara un sistema nuevo, no habría datos históricos disponibles. En esos casos se puede utilizar la simulación como una herramienta independiente para comprobar el resultado del modelo matemático.

7.2.1.5.Implementación de la solución.

Consiste en la transformación de los resultados en instrucciones de operación comprensibles que se emitirán a las personas que administrarán el sistema recomendado.

7.2.2. Optimización.

Dentro de la investigación operativa, las técnicas de optimización se enfocan en determinar la política a seguir para maximizar o minimizar la respuesta del sistema. Dicha respuesta, en general, es un indicador del tipo “Costo”, “Producción”, “Ganancia”, etc., la cual es una función de la política seleccionada. Según Baquela (2013) dicha respuesta se denomina objetivo, y la función asociada se llama función objetivo.

Una política es un determinado conjunto de valores que toman los factores que se pueden controlar a fin de regular el rendimiento del sistema. Resumiendo, un problema de optimización está compuesto de los siguientes elementos:

- Un conjunto de restricciones.
- Un conjunto de soluciones factibles, el cual contiene todas las posibles combinaciones de valores de variables independientes que satisfacen las restricciones anteriores.
- Una función objetivo, que vincula las soluciones factibles con la performance del sistema.

7.2.2.1. Clasificación de problemas de optimización.

En base a su naturaleza, hay varias formas de clasificar un problema de optimización. Analizar en qué categoría entra es importante para definir el método de solución a utilizar, ya que no hay un método único para todos los posibles problemas (Baquela, 2013).

Se dice que es un problema de “Optimización Continua” cuando todas las variables de decisión pueden tomar cualquier valor perteneciente al conjunto de los reales. Cuando tanto la función objetivo como las restricciones son lineales, se habla de un problema de “Optimización Convexa Lineal” o “Programación Lineal”. En el caso de trabajar con variables discretas (es decir, que solo puedan tomar valores enteros) se trata de un problema de “Optimización Combinatoria”. Por raro que pueda parecer, en general un problema de optimización combinatoria es más complicado de resolver que uno de optimización continua. Por otro lado cuando todas las variables son determinísticas, se dice que es un problema determinista, en caso contrario se define como un problema estocástico. El modelado y resolución de un problema estocástico es mucho más complejo que el modelado de un problema determinístico.

7.2.3. Problemas de optimización combinatoria.

Blum & Roli (2008) afirman que los problemas de optimización combinatoria son aquellos que buscan una solución “óptima” o la que encuentra el valor máximo o mínimo dentro de un espacio finito, o infinito, numerable de soluciones factibles definido por la función objetivo.

Según Marek (2010) los problemas genéricos de optimización combinatoria requieren encontrar la solución más óptima sobre un conjunto finito de soluciones. Por ende las variables a usar han de ser de carácter discreto, restringiendo su dominio a una serie finita de valores. Si agrupamos las variables en conjuntos que representan grafos u objetos, lo ideal es ubicar dichas variables en determinadas posiciones, la técnica a usar es de carácter combinatorio.

7.3.Complejidad computacional

Un problema desde el punto de vista computacional está conformado por “un conjunto de datos de entrada, un conjunto de datos de salida y una función que asigna a cada dato del problema, una salida correcta del mismo (Pérez y Sancho, 2003). Los valores particulares que toman los datos de entrada (parámetros) son definidos como instancias del problema. Este puede ser resuelto mediante la implementación de un algoritmo, que es una secuencia de pasos definidos, que transforman los datos de entrada en datos de salida.

Matemáticamente los problemas pueden ser clasificados por el grado de dificultad de acuerdo con la complejidad computacional del algoritmo que permite su resolución. De esta manera los problemas pueden ser clasificados en problemas tratables y no tratables.

Problemas P:

Hamalainen (2016) afirma que un problema es tratable cuando puede ser resuelto en tiempo polinómico (clase P), donde el tiempo de ejecución crece de forma polinomial con el tamaño de los datos de entrada. Todos los problemas en esta clase tienen una solución cuyo requisito de tiempo es un polinomio en el tamaño de entrada n .

Problemas NP:

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

Problemas NP-completo:

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

Problemas NP-hard:

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

7.4.Métodos de solución

Los problemas combinatorios presentan como particularidad que siempre existe un algoritmo exacto que permite obtener la solución óptima. Este método consiste en la exploración de forma exhaustiva del conjunto de soluciones. Este algoritmo suele ser extremadamente ineficiente, ya que para la mayoría de los problemas de interés que se pueden encontrar en el ámbito de la optimización combinatoria el tiempo que emplearía en encontrar una solución carece de forma exponencial con el tamaño del problema. Debido a la dificultad que existe en resolver dichos problemas de forma exacta, se plantea la opción de encontrar soluciones de calidad en tiempos razonables, aunque estas soluciones no sean óptimas. Para esta tarea Muñoz (2007) concluye que se necesita usar algoritmos aproximados que permitan resolver los problemas combinatorios.

7.4.1. Métodos exactos.

Este tipo de métodos se caracterizan según Chicano (2007) por “encontrar la solución óptima para cualquier instancia de cualquier problema en un tiempo acotado”. Siendo muy utilizado para resolver problemas de tipo NP-HARD, aunque presenta cierto inconveniente por sus tiempos de desarrollo bastante elevado, ya que la solución crece exponencialmente con el tamaño del problema. A continuación se describen las características básicas de algunos métodos exactos.

Método simplex:

Este método parte de una solución inicial, y examina si alguna de las aristas de la posición actual conduce a una tasa positiva de mejoramiento de la función objetivo. En caso de presentarse una mejor solución, se realiza una iteración para moverse a esta posición y se examina la tasa de mejoramiento de cada arista de la misma. El algoritmo finaliza, cuando ninguna de las aristas de la actual posición conlleva a una tasa de mejoramiento positiva, estableciendo esta como la solución óptima (Hillier, Frederick, Lieberman & Gerald, 2010).

Algoritmo de ramificación y acotamiento:

La idea del algoritmo de ramificación y acotamiento (B&B) es iniciar con la solución óptima del problema de asignación asociado. Si la solución es un recorrido, el proceso termina. De lo contrario, se imponen restricciones en la solución resultante para imposibilitar los sub recorridos. La idea es crear ramas que asignen un valor cero a cada una de las variables de uno de los sub recorridos. Por lo común, el sub recorrido con la menor cantidad de ciudades se selecciona para la ramificación porque es el que crea el menor número de ramas. (Taha, 2012)

Métodos aproximados

Ofrecen la posibilidad de encontrar soluciones en tiempos razonables para los problemas de tipo NP-Hard, aunque estas soluciones no son las más óptimas, muchas se consideran muy cercanas a las óptimas. Este tipo de métodos se clasifican en: heurísticas y metaheurísticas.

7.4.2. Heurísticas.

Reeves (2010) define las Heurísticas como “Un procedimiento que busca buenas soluciones a un costo computacional razonable, aunque no se garantice su optimalidad, e incluso, en algunos casos no se llegue a establecer qué tan cerca este de la optimalidad y factibilidad”. Una heurística debe cumplir con los siguientes principios:

1. Debe ser capaz de proporcionar aproximaciones de alta calidad al óptimo global.
2. Debe ser robusta, es decir, ser flexible a los cambios presentados por el problema.
3. Debe poder aplicarse fácilmente a muchas instancias del problema y de hecho, poder aplicarse a nuevos problemas, a pesar de que casi siempre es desarrollada para la solución de un problema específico.
4. Gilli & Winker (2007) concluyen que las heurísticas pueden ser algoritmos estocásticos pero no deben contener elementos subjetivos.

7.4.2.1. Método heurístico de Ardalan

Huertas y Domínguez (2015) afirman que el método heurístico de Ardalan es uno de los algoritmos más utilizados para la localización de servicios. Su objetivo es establecer la ubicación de un punto de servicio en un área geográfica, teniendo en cuenta una optimización en términos de distancia, cobertura y algún factor de ponderación que refleje una importancia relativa de atención de algún punto.

7.4.2.2. Algoritmos Kruskal o Voraces

Los algoritmos voraces funcionan en fases. En cada fase se toma una decisión que parece ser la mejor, sin tener en cuenta las consecuencias futuras de esa decisión. Cuando el algoritmo termina, se espera que la solución sea la óptima para el problema planteado, si es así, el algoritmo es correcto, si no, el algoritmo produce una respuesta sub-óptima, la cual es muy cercana a la mejor solución, estos algoritmos son usados si la solución de un problema es demasiado compleja y se requiere una respuesta rápida aproximada a la mejor opción (Pelegrín, 2004).

Estos métodos son utilizados para resolver problemas de optimización, que pueden tener como objetivo minimizar o maximizar. Entre los algoritmos voraces se encuentran:

Algoritmo de Prim

El algoritmo de Prim es tal vez el algoritmo de MST (Arboles Generadores Mínimos) más sencillo de implementar y el mejor método para grafos densos. Este algoritmo puede encontrar el MST de cualquier grafo conexo pesado (Guerequeta & Vallecillo, 1998).

Sea V el conjunto de nodos de un grafo pesado no dirigido. El algoritmo de Prim comienza cuando se asigna a un conjunto U de nodos un nodo inicial Perteneciente a V , en el cual "crece" un árbol de expansión, arista por arista. En cada paso se localiza la arista más corta (u, v) que conecta a U con $V-U$, y después se agrega v , el vértice en $V-U$, a U . Este paso se repite hasta que $V=U$. El algoritmo de Prim es de $O(N^2)$, donde $|V| = N$.

Algoritmo de Dijkstra

El algoritmo de Dijkstra da solución al problema de encontrar el camino mínimo entre un vértice dado, el llamado inicial, y todos los restantes del grafo. Funciona de una forma semejante al algoritmo de Prim: supongamos que en VISTOS se tiene un conjunto de vértices tales que, para cada uno de ellos, se elige el vértice v , $v \in V-Vistos$, con $b[v]$ mínima, que es el mismo proceso que realiza el algoritmo de Prim, al seleccionar el vértice con el menor valor.

Finalmente este método necesita actualizar convenientemente los valores de b , cada vez que un nuevo vértice entra en Vistos, para mantener la corrección del contenido de b

Algoritmo de Kruskal

Mediante una función de selección, selecciona la arista de menor valor, entre todas las que no se han considerado, y que conecta dos vértices. En segundo lugar vuelve a tener en cuenta todas las aristas del grafo, para seleccionar la de segundo menor peso, y así sucesivamente, teniendo fin cuando todos los nodos del grafo se hayan considerado en el modelo. Esto teniendo en cuenta que no se pueden formar ciclos.

7.4.2.3. Algoritmo del vecino más cercano

Este algoritmo es un heurístico constructivo, que da solución al problema del agente viajero (TSP). Su procedimiento consiste en construir un ciclo Hamiltoniano de bajo costo, basándose en el vértice más cercano a un nodo de referencia (Joyanes, 2005).

- 1) Los pasos del algoritmo son:
- 2) Elegir de un vértice arbitrario
- 3) Encontrar la arista de menor peso que ya esté conectada al vértice actual y a un vértice no visitado NV.
- 4) Convertir el vértice actual en NV.
- 5) Marcar NV como visitado.
- 6) Si todos los vértices del dominio han sido visitados, cerrar el algoritmo.
- 7) Volver al paso 2.
- 8) La secuencia de los vértices visitados es la salida del algoritmo.

En otras palabras, el algoritmo consiste en seleccionar un vértice inicial V_1 , mediante el cual se miden las distancias entre este y los vértices restantes, eligiendo aquel que se encuentre más próximo (Vecino más cercano V_2). Posteriormente se construye una trayectoria $V_1, V_2, V_3, \dots, V_k, V_{k+1}, \dots, V_n$; en donde el vértice V_{k+1} se elige tomando la distancia mínima entre V_k y cada uno de los vértices distintos a los seleccionados anteriormente, finalmente se agrega el arco que se encuentra entre el vértice V_n y V_1 , con el objetivo de cerrar el tour (Ríos y Gonzáles, 2000).

7.4.3. Metaheurísticas.

Son una clase de métodos aproximados diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria en los que los heurísticos clásicos no son efectivos. Las metaheurísticas proporcionan un marco general para crear nuevos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos (Kaufman & Kelly, 2001).

7.4.3.1. Metaheurísticas basadas en trayectoria

Estas técnicas parten de un punto inicial y van actualizando la solución presente mediante la exploración del vecindario, formando una trayectoria. La búsqueda finaliza cuando se alcanza un número máximo de iteraciones, se encuentra una solución con una calidad aceptable, o se detecta un estancamiento del proceso. A continuación se describen algunas de las técnicas metaheurísticas basadas en trayectoria (González, 2008):

El Enfriamiento Simulado

Es una de las metaheurísticas más antigua. Simula el proceso de recocido de los metales y del cristal. En cada iteración se elige una solución S1, a partir de la solución actual S0. Si S1 es mejor que S0, S1 sustituye a S0 como solución actual. Si S1 es peor que S0, se sigue aceptando pero asignándole una determinada probabilidad. El algoritmo permite elegir soluciones peores a la actual para evitar caer en un óptimo local.

La Búsqueda Tabú

Es una de las metaheurísticas más utilizadas en problemas de optimización. Se basa fundamentalmente en la utilización de un historial de búsqueda, que permite ejecutar su estrategia de análisis y exploración de diferentes regiones del espacio de búsqueda. Este historial o memoria se implementa como una lista tabú. En cada iteración se elige la mejor solución entre las permitidas y se añade a la lista tabú, donde se mantienen las soluciones recientes que se excluyen de las siguientes iteraciones.

La Búsqueda en Vecindario Variable (BVV)

Este algoritmo es muy genérico, con muchos grados de libertad y permite variaciones y modificaciones particulares. Utiliza una estrategia de cambio entre diferentes estructuras del vecindario. Estas estructuras se definen en el comienzo del proceso algorítmico.

7.4.3.2. Metaheurísticas basadas en población

Las técnicas metaheurísticas basadas en población trabajan con un conjunto de individuos que representan otras tantas soluciones. Su eficiencia y resultado depende fundamentalmente de la forma con la que se manipula la población en cada iteración. A continuación se describen algunas de las técnicas metaheurísticas basadas en población (González, M et al., 2008):

Los Algoritmos Evolutivos (AE)

Este grupo de técnicas se inspiran en la capacidad de la evolución de seres o individuos para adaptarlos a los cambios de su entorno. Cada individuo representa una posible solución. El

funcionamiento básico de estos algoritmos es el siguiente: La población se genera de forma aleatoria. Cada individuo de la población tiene asignado un valor de su bondad con respecto al problema considerado, por medio de una función de aptitud, capacidad, adaptabilidad o estado, también denominada con bastante frecuencia por la palabra inglesa “fitness”. El valor de la aptitud de un individuo es la información que el algoritmo utilizar para realizar la búsqueda. La modificación de la población se efectúa mediante la aplicación de tres operadores: selección, recombinación y mutación. En estos algoritmos se pueden distinguir la fase de selección, explotación de buenas soluciones, y la fase de reproducción, búsqueda de nuevas regiones. Se debe de mantener un equilibrio entre estas dos fases. La política de reemplazo permite la aceptación de nuevas soluciones que no necesariamente mejoran las existentes. Los algoritmos evolutivos se pueden clasificar en las siguientes tres categorías: Programación Evolutiva (PE), Estrategias Evolutivas (EE), y los Algoritmos Genéticos (AG), que constituyen una de las técnicas más conocidas, y que fueron introducidos por Holland.

La Búsqueda Dispersa (BD)

Se basa en mantener un conjunto relativamente pequeño de soluciones, conjunto de referencia, que contiene buenas soluciones y otras soluciones diversas. A los diferentes subconjuntos de soluciones que se forman se les aplica operaciones de recombinación y mejora.

Los sistemas basados en Colonias de Hormigas, (ACO)

Se inspiran en el comportamiento de las hormigas cuando buscan comida: inicialmente, las hormigas exploran el área cercana al hormiguero de forma aleatoria. Cuando una hormiga encuentra comida, la lleva al hormiguero. En el camino, la hormiga va depositando una sustancia química denominada feromona que guía al resto de hormigas a encontrar la comida. El rastro de feromona sirve a las hormigas para encontrar el camino más corto entre el hormiguero y la comida. Este rastro es simulado mediante un modelo probabilístico.

Los Algoritmos Basados en Nubes de Partículas (PSO)

Son técnicas metaheurísticas inspiradas en el comportamiento del vuelo de las bandadas de aves o el movimiento de los bancos de peces. La toma de decisión por parte de cada individuo o partícula se realiza teniendo en cuenta una componente social y una componente individual, mediante las que se determina el movimiento de esta partícula para alcanzar una nueva posición.

Métodos híbridos

Los algoritmos híbridos metaheurísticos se basan en la combinación de varias metaheurísticas, con el fin de aprovechar las fortalezas y eliminar las limitaciones individuales, generando métodos de búsqueda más potentes y flexibles. Se pueden distinguir tres formas principales de hibridación (Blum, Christian et al., 2008), pero la mayoría de los algoritmos híbridos pertenecen a la categoría de hibridación de componente de intercambio, en el que varios

componentes y características de solución están compartidos entre dos o más métodos heurísticos y metaheurísticos.

7.4.4. Computación evolutiva.

La computación evolutiva es un enfoque alternativo para abordar problemas complejos de búsqueda y aprendizaje a través de modelos computacionales de procesos evolutivos. Las implantaciones concretas de tales modelos se conocen como algoritmos evolutivos. La idea básica consiste en guiar una búsqueda estocástica haciendo evolucionar a un conjunto de estructuras y seleccionando de modo iterativo las más adecuadas (D'íez, Gómez y Martínez, 2001). Sobre el esquema general se han desarrollado una serie de paradigmas, los más importantes son:

7.4.4.1. Programación evolutiva

La programación evolutiva (EP) propuesta en la década de los 60 por Lawrence Fogel, surge como un enfoque alternativo a la inteligencia artificial. Las representaciones usadas en la programación evolutiva se realizan mediante números reales (cualquier estructura de datos), y emplea los mecanismos de mutación y selección. El procedimiento es muy similar a las estrategias evolutivas con la diferencia de que no emplea la recombinación (Fogel, 1962).

- a) Generar aleatoriamente una población inicial (N padres).
- b) Se aplica la mutación de cada uno de ellos para obtener la descendencia N.
- c) Se calcula la aptitud de cada hijo y se usa un proceso de selección mediante torneo (normalmente estocástico) para determinar cuáles serán las soluciones que se retendrán.

7.4.4.2. Algoritmos genéticos

Los Algoritmos Genéticos (AGs) son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en el proceso genético de los organismos vivos. A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan en la naturaleza de acorde con los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes, postulados por Darwin (1859). Por imitación de este proceso, los Algoritmos Genéticos son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real. La evolución de dichas soluciones hacia

valores óptimos del problema depende en buena medida de una adecuada codificación de las mismas (Moujahid & Inza, 2008).

7.5.El modelo de Localización-Asignación

Los Modelos de localización-asignación son un conjunto de procedimientos matemáticos que intentan buscar soluciones al problema de dónde situar centros de servicios (en sentido amplio), de manera que se optimicen ciertos valores considerados importantes a la hora de que los usuarios utilicen dichos servicios. Esto implica, por lo tanto, definir primero las magnitudes que son relevantes para el empleo de las instalaciones por la población y después formular una expresión matemática de dichas magnitudes, de tal manera que el modelo obtenga un óptimo de su valor, mínimo o máximo, dependiendo del tipo de servicio a localizar (Bosque & Maass, 1995).

Los modelos de localización-asignación hasta ahora definidos consideran dos magnitudes: la eficiencia espacial de la localización de los centros de servicio y la justicia espacial de su distribución en el territorio (Bosque, 1992).

7.5.1. La eficiencia espacial

Se refiere al volumen global de desplazamientos que el conjunto de la demanda debe efectuar para utilizar las instalaciones y trata de medir el coste, en tiempos de recorrido o distancias, que la población se verá obligada a recorrer para poder utilizar los servicios. Esta distancia evidentemente tiene un coste monetario, más o menos fácil de medir, y que se busca reducir lo más posible. La eficiencia puede medirse también en función de los beneficios netos y, en términos de economías de escala, será mayor en la medida en que se logre el tamaño y emplazamiento que maximice el consumo del servicio (Marsh & Schilling, 1994).

7.5.2. La justicia espacial

Se refiere a la accesibilidad diferencial de un servicio a los distintos grupos de la población, es decir, al grado de igualdad en la distribución de los servicios que presta cada instalación entre la población. La justicia espacial depende en este caso de la mayor o menor facilidad de acceso y depende de la variabilidad de las distancias que separan a cada individuo de la instalación más próxima, del tamaño de la oferta existente en dicha instalación y de la disponibilidad temporal de los servicios.

Los problemas de optimización combinatoria han presentado diversas aplicaciones prácticas, como en situaciones del mundo real, haciendo que sean temas atractivos para investigación y extensión. Múltiples métodos han sido creados para intentar dar solución a estos problemas.

7.5.3. Localización de Albergues como respuesta a la ocurrencia de un desastre

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

Teniendo como objetivo brindar una respuesta inmediata al desastre ocurrido, en la logística humanitaria se habla de la localización de albergues temporales, los cuales la Federación Internacional de la Cruz Roja y la Media Luna Roja (2008) los definen como: “Lugares donde se proporciona temporalmente techo, alimentación, vestido y salud a personas vulnerables, antes, durante o después de la ocurrencia de un fenómeno destructivo o después de la ocurrencia de este”.

7.5.4. Tipología de Albergues Temporales.

Según factores como la complejidad del desastre y la capacidad local, existen diversos tipos de albergues para refugiar a la población afectada por el desastre (Cruz Roja, 2008).

7.5.4.1. Auto albergues.

Denominados a la situación de traslado de una persona o un grupo de personas afectadas, a una vivienda de algún familiar o amigo.

7.5.4.2. Albergues comunitarios.

Fijos: Espacios utilizados de manera transitoria, para dar refugio a una comunidad afectada por la ocurrencia de algún desastre. Dichos lugares no son construidos con el objeto de albergar

personas, pero debido a su capacidad, son útiles para hacer frente a la ocurrencia de un desastre. Estos espacios deben contar con servicios básicos. Por lo general se utilizan escuelas y colegios.

Campamentos de emergencia: Son elementos que se pueden armar y desarmar con facilidad; como tiendas o carpas, los cuales son construidos con condiciones dignas para la permanencia durante un corto tiempo de personas afectadas por algún desastre.

7.5.4.3. Albergues fijos.

Construcciones que realizan el estado u organizaciones privadas, con el objetivo de dar refugio a una comunidad cuando esta se ve afectada por la ocurrencia de algún desastre, dichos lugares cuentan con los servicios básicos esenciales para la permanencia temporal de las personas afectadas.

7.5.4.4. Multi albergues.

En la ocurrencia de grandes desastres en ocasiones es necesario albergar personas en diversos lugares del mismo sector, debido a la imposibilidad de encontrar un lugar con la capacidad demandada. Por tanto las personas se refugian en los diferentes tipos de albergues: Auto albergues, albergues comunitarios y albergues fijos.

7.5.4.5. Estrategias gubernamentales.

En ocasiones los gobiernos optan por estrategias como Subsidios de arriendo, como manera de contribuir a personas afectadas por la ocurrencia de un desastre. Dicha alternativa es factible cuando los damnificados cuentan con algún recurso económico para costear un porcentaje del arriendo de la vivienda.

8. Identificación de Posibles Albergues en Bucaramanga y Área Metropolitana

El Plan de Emergencias y Contingencias del municipio de Bucaramanga y su área metropolitana se encuentra actualmente en construcción, por lo tanto, se hace necesaria la revisión de otros planes realizados, como el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastre, en el caso concreto de Bucaramanga, como herramienta para determinar posibles ubicaciones de albergues en el caso de ocurrencia de una inundación o remoción de masa.

8.1.Bucaramanga

Según estudios realizados como el de sismicidad a escala Nacional, estudios de microzonificación sísmica, estudios de erosión y remoción en masa, Estudios Detallados de Amenaza y/o Riesgo, por Fenómenos Remoción en masa e Inundación -EDARFI, estudios de Problemáticas de Precariedad Urbana en Asentamientos y Barrios, y estudios de inundación, que nos permite estimar riesgo desde una óptica de susceptibilidad, el municipio se encuentra en amenaza permanente de la ocurrencia de tres escenarios de riesgo de origen hidrometeorológico (CMGRD, 2013):

- Riesgo por sismos
- Riesgo por erosión y remoción en masa
- Riesgo por inundación

El presente capítulo trata de identificar una posible ubicación de centros de distribución y albergues en Bucaramanga, en caso de ocurrencia de inundaciones o remoción de masa en el municipio, por tanto se analizarán dichos escenarios.

8.1.1. Riesgo por erosión y remoción en masa.

La erosión en los suelos de la meseta de Bucaramanga es un fenómeno tan antiguo como su misma formación, solo que la ocupación de aquella ha acelerado tanto el problema que ha llegado a constituirse en una grave amenaza para los habitantes de los sectores periféricos de la ciudad. Es causada por la acción directa e indirecta de las aguas lluvias y por la presencia de aguas subterráneas, las cuales favorecen y aceleran el proceso de meteorización, el cual reduce la resistencia de las rocas, ocasionando su desintegración y descomposición (CMGRD et al., 2013).

Zonas de alto riesgo por erosión y remoción de masa.

En la *zona Norte* de la meseta del municipio se han presentado un gran número de deslizamientos debido a diversos factores como la poca consolidación de los terrenos, movimientos de agua y existencia de asentamientos de tipo precario. Los deslizamientos de tierra en esta zona han afectado principalmente a los barrios La Esperanza, Lizcano, El Mirador, José María Córdoba, Villa Rosa y Villa Helena.

En la *zona Oriental* las rocas se encuentran fracturadas y presentan deslizamientos en zonas habitadas, debido a la conformación no planeada de barrios, entre ellos: Buenos Aires, Miraflores, El Diviso, Vegas de Morrorrico, la parte alta del barrio Albania y en el sector rural los asentamientos la Malaña y Santa Bárbara.

En la *zona Occidental* se presentan deslizamientos y desprendimiento de bloques, debido a terrenos fácilmente erodables, que presentan alta permeabilidad.

En la *zona Sur* del municipio también se presenta este fenómeno, en su mayoría en las comunas N°9, 10 y 11, debido a la construcción de asentamientos en áreas de reserva forestal.

Se han identificado entonces las zonas que se encuentran en mayor riesgo de deslizamientos, las cuales son:

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

8.1.2. Riesgo por inundación.

La ocurrencia de desastres por inundaciones ha tenido su origen en el uso indiscriminado del suelo, utilización urbanística de la llanura de inundación del río, obstrucción de redes de alcantarillado y laderas deforestadas; que han provocado un cambio abrupto de temperatura y el desborde de caños y canales.

La presencia de infraestructuras y viviendas en zonas potencialmente inundables, hace que ante un aumento del nivel del río ocasione pérdidas físicas, económicas, sociales y ambientales. Bucaramanga se ve afectado principalmente por eventos de inundación por los Ríos de Oro y Suratá (CMGRD, 2013).

Se observa una crisis social por la exposición constante a la amenaza de escenarios de inundaciones de poblaciones con pocos recursos económicos, debido a su forzada localización en dichos terrenos, por ser predios de bajo costo por su alto peligro de desastres.

De igual manera se han logrado identificar las zonas que presentan mayor riesgo, que son los barrios: Café Madrid (Sector Swiche, El Túnel, La Playa, La Playita, El Cable); Chimita (Carlos Pizarro, 5 de Enero, Zona Industrial Chimita, José Antonio Galán); y Rincón de la Paz.

Estudios del POT 2011, han logrado identificar áreas con riesgo susceptible por factor geológico e hidrológico mediante polígonos (*Ver mapa en Apéndice A.*), y la exposición de viviendas ubicadas en estas zonas relacionadas con restricción de ocupación, así (CMGRD, 2013):

Comprende la comunidad ubicada en:

- La zona de amortiguación uno y dos de la comuna Occidental, García Rovira, Mutis y Provenza entre el escarpe occidental hasta el pie de ladera vía, Palenque; escarpe malpaso hasta pie de ladera de la vía Girón.
- En la comuna nor-oriental, donde se ubican barrios de la Esperanza I, II, III, Villa helena, José maría Córdoba, Mirador norte entre otros.
- En la comuna de Morrорico, comprende gran parte de los barrios que la conforman.
- En el sector Cabecera por la zona de escarpe y pie de talud oriental de Bucaramanga.
- Sector de la comuna del norte

A partir de la información indicativa disponible para el sector objeto de análisis, se advierte la ubicación de una gran cantidad de predios en amenaza alta y muy alta que presentan pendientes de ladera alta y muy alta (superior al 40%), suelos residuales, coluviales recientes, rocas intermedias y blandas, presentando altas probabilidades a movimientos en masa de gran magnitud lo que eventualmente ocasionaría pérdida de vidas humanas, destrucción parcial o total de viviendas, obstrucción o destrucción de caminos, vías, sistemas de drenaje, canales, alcantarillas (Ingeominas, 2007)

Se concluye que a pesar del conocimiento de la situación el municipio no cuenta con un plan estructurado de logística humanitaria, para poder responder de manera favorable y eficiente en el momento de algún deslizamiento o inundación, y se reconoce en el PMGRD de Bucaramanga que el municipio presenta una crisis social por la necesidad de albergue para los posibles damnificados y por la falta de conocimiento de las entidades del consejo de gestión del riesgo de desastres para la asignación de recursos en dicho escenario, igualmente se reconoce un desconocimiento de la aplicación de la normatividad de Gestión del Riesgo.

Igualmente se presenta una preocupación debido a que a pesar del gran porcentaje de la población de Bucaramanga que se encuentra en alto riesgo de ocurrencia de desastre por remoción de masa e inundaciones, el plan de acción que contempla el municipio se encuentra enfocado únicamente a la mitigación del riesgo. No se incluye acción alguna para la gestión pre y post-desastre.

Según la información anterior se utiliza la herramienta My Maps se adapta el mapa de la investigación realizada por Barrera y Hernández (2015), con zonas de riesgo de remoción de masa e inundación identificadas, así como la localización de puntos de demanda en estas zonas y de posibles lugares que se puedan adaptar como albergues para la demanda de personas afectadas en escenario de un desastre natural mencionado (*Ver Apéndice A*)

8.2. Área Metropolitana de Bucaramanga

Aunque se observa que el PMGRD del municipio de Bucaramanga no se encuentra completo, debido a que únicamente está encaminado a la mitigación del riesgo, los Planes Municipales de los municipios pertenecientes al Área Metropolitana (Girón, Floridablanca y Piedecuesta) están prácticamente sin empezar su construcción.

A pesar de esto el Plan de Ordenamiento Territorial de cada municipio, ha estudiado los riesgos de desastres presentes en los mismos, e identificado las zonas que se encuentran amenazadas.

8.2.1. Zonas en mayor amenaza del municipio San Juan de Girón

Por inundación (Concejo Municipal POT, 2010).

- Centro abastos
- Zona industrial alrededor del Río de Oro
- Barrio Chimita
- Barrio el Palenque
- Penagos
- Barrio Los Caneyes
- Barrio Puerto Madero
- Barrio Riveras del Río
- Quebrada Aguablanca

Por remoción de masa

- Barrio La campiña
- Barrio El Poblado
- Barrio San Juan
- Barrio San Jorge
- Vía Lebrija-Girón
- Vía Barrancabermeja-Bucaramanga
- Barrio Altos de Bellevista

8.2.2. Zonas en mayor amenaza del municipio Piedecuesta

Por inundación (Concejo Municipal POT, 2003).

- Alrededores del Río Hato
- Barrio La Colina
- Barrio Cabecera del Llano I
- Barrio Villas del Río
- Barrio Nuevo Día
- Barrio Candelaria
- Barrio Barroblando
- Paseo del Puente
- Barro Blando
- Quebrada Diamante

Por remoción de masa

- Barrios cercanos a la zona que atraviesa la falla de Bucaramanga como: San Cristóbal, San Francisco, San Carlos y Villas de San Juan
- Barrio Buenos Aires
- Barrio Villas del Rosario
- Barrio Bellavista
- Quebrada la Calera

8.2.3. Zonas en mayor amenaza del municipio Floridablanca.

Centro de Estudios Regionales UIS (2000) Afirma que “El acelerado crecimiento demográfico del Municipio durante la última década ha traído consigo modificaciones en el uso del suelo, crecimiento de concentraciones poblacionales en terrenos marginales como riberas de drenajes, zonas de ladera topográficamente escarpadas y predios potencialmente inestables. Si a los factores anteriores se les suma la complicada situación tectónica y sísmica del área, la fisiografía escarpada del Macizo y de algunas áreas de la meseta, la variada composición geológica y las variables condiciones climáticas de la zona, se tiene que buena parte del

municipio de Floridablanca se encuentra amenazada por estos fenómenos que afectan tanto a roca como a suelo y cobertura vegetal”.

Igualmente que “La amenaza para la zona urbana y su área de influencia se localiza en las márgenes o llanuras de inundación de las corrientes principales como son: río Frío quebrada Zapamanga, Suratoque y La Ronda. Estas áreas son de mayor peligro por encontrarse cerca de centros densamente poblados; además de las anteriores están la Palmichal, Mensulí y Aranzoque, con áreas de influencia menos pobladas”.

Por inundación

- Barrio El Carmen
- Barrio La Trinidad
- Lagos II
- Barrio Andalucía

Por remoción de masa

- El cerro La Cumbre
- Zapamanga quinta etapa
- Barrio Belencito
- Inmediaciones de Lechesan
- Autopista Floridablanca-Piedecuesta
- Alrededor del Río Frío-Cañaveral
- Barrio Cerros
- Barrio La Esmeralda
- Barrio Molinos bajo

Al igual que hizo para el municipio de Bucaramanga, se hace uso la herramienta My Maps para el levantamiento de los mapas de los municipios San Juan de Girón (*Ver Apéndice B*), Piedecuesta (*Ver Apéndice C*) y Floridablanca (*Ver Apéndice D*), identificando en ellos zonas de riesgo de remoción de masa e inundación, así como la localización de puntos de demanda en estas zonas y de posibles lugares que se puedan adaptar como albergues para la demanda de personas afectadas en escenario de un desastre natural mencionado.

En los mapas se logra apreciar la diferenciación de las zonas que se encuentran amenazadas, diferenciando en cada una de ellas los diferentes niveles de riesgo a los que se puede encontrar expuesta, siendo el riesgo alto, el nivel de riesgo en el que hay una mayor probabilidad de ocurrencia de algún tipo de siniestro, sea inundación o remoción de masas.

También se identificaron las zonas de concentración de la población, que serán los posibles nodos o zonas de demanda que deben ser asignados a los diferentes albergues habilitados, demarcando la zona que comprende ésta demanda y un punto de geo localización que indica la ubicación del nodo.

9. Caracterización y Evaluación de las Instalaciones Propuestas

9.1. Criterios de Ubicación y Selección de un Albergue

La localización de un albergue debe ser evaluada por parte de personal capacitado, dicho sitio debe estar alejado de la zona afectada y no estar expuesto a factores de amenazas naturales o de orden público y se deben tener en cuenta varias observaciones (Dirección General de Protección Civil, 2013).

- Buen manejo de los servicios básicos en el albergue
- Buen manejo de la higiene
- Buen manejo de la basura
- Buen manejo de las aguas negras
- Buena organización del albergue (Seleccionar responsables de las tareas)

La Cruz Roja Colombiana ha determinado siete criterios para la ubicación de un albergue temporal:

- Accesibilidad
- Criterios no estructurales
- Topografía
- Criterios estructurales
- Área de superficie
- Criterios Geológicos, Hidrológicos y Climáticos
- Seguridad

Tabla 2.

Descripción de criterios de localización de Albergues Temporales

Criterio	Aspectos a considerar
<i>Accesibilidad</i>	• Condiciones de acceso y evacuación en caso de emergencia • Vías de acceso terrestre, fluvial, marítima o aérea • Condiciones de las vías que rodean el Albergue Temporal • Espacio para adecuación de helipuerto • Posibilidad de acceso de vehículo de carga
<i>Criterios no estructurales</i>	• Área del espacio físico disponible • Facilidad para construcción de servicios sanitarios (baños, letrinas, duchas) y zona de lavandería • Espacio para área de cocina y comedor • Redes cercanas de agua potable, alcantarillado y energía eléctrica • Espacios adecuados para implementación de áreas logística, salud y bienestar social.
<i>Topografía</i>	• Cuencas no deben sobrepasar 6% de inclinación, ni por debajo de 1% para que sea posible movimiento de agua • Canales de avenamiento para reducir inundaciones o formación de charcos de agua
<i>Criterios estructurales</i>	• Condiciones de la edificación • Año de construcción de la edificación • Vulnerabilidad de la edificación a amenazas • Capacidad de la estructura para soportar peso extra • Disponibilidad y condición de servicios higiénicos y zona de lavandería

	• Existencia de sistema eléctrico de iluminación y ventilación
<i>Área de la superficie</i>	• Se recomienda otorgar un espacio de 4m² por persona
<i>Criterios geológicos, hidrológicos y climáticos</i>	• Existencia de mapeos de amenazas geofísicas del terreno • Registro histórico de comportamientos dinámicos de la región • Topografía permite desagüe fácil • Riesgos hídricos de inundación, precipitación de lluvias y escorrentía del terreno • Terreno libre de elementos que imposibiliten o impidan construcción y adecuación de albergue con comodidad para los afectados
<i>Seguridad</i>	• Existencia de riesgos tipo natural, tectónico o antrópico que puedan afectar la población albergada • Zona de alteraciones de orden público • Zona expuesta a contaminación • Zona con protección natural frente a condiciones de clima • Existencia de flora y fauna perjudicial para el ser humano • Riesgos de contaminación industrial • Delincuencia común

Adaptado de: Sociedad Nacional de La Cruz Roja Colombiana, Manual Nacional para el manejo de Albergues Temporales, 2008.

9.2. Caracterización de Posibles Albergues

Para la caracterización de los lugares potenciales para los albergues se hará uso de la Metodología de ponderación de factores, para posteriormente realizar una comparación de las diferentes alternativas, y así conseguir las mejores ubicaciones de los albergues.

La ecuación del método de ponderación de factores es la siguiente:

$$S_j = \sum_{i=1}^m (W_i * F_{ij})$$

En donde:

S_j Puntuación global de cada alternativa j

W_i Peso ponderado de cada factor i

F_{ij} Puntuación de las alternativas j por cada uno de los factores i

Se tomarán en cuenta los 4 factores que se consideran más relevantes: Criterios geológicos, hidrológicos y climáticos, Accesibilidad, Criterios no estructurales y Criterios estructurales.

Peso relativo de cada factor (%)

- Accesibilidad (FA) 25%
- Criterios no estructurales (FCNE) 20%
- Criterios estructurales (FCE) 20%
- Criterios geológicos, hidrológicos y climáticos (FCGHC) 35%

Para realizar la evaluación del criterio Accesibilidad se hace uso de la herramienta Google Maps, para observar la condición en la que se encuentran las vías de acceso al lugar y el número de vías que permiten acceder al mismo, esto se hace realizando una calificación entre 1 y 5, siendo 1 el peor acceso y 5 el mejor. Para el análisis del factor Criterios no estructurales, se tendrán en cuenta específicamente las características: Área total del lugar y si este cuenta con servicios públicos necesarios para la construcción de albergues (Agua, gas y electricidad), calificando entre 1 y 3, de acuerdo al número de servicios con el que cuenta el establecimiento. Por otro lado para evaluar el factor Criterios geológicos, hidrológicos y climáticos, se realiza una medición mediante la herramienta Google Maps para determinar la distancia del albergue a la zona de alto riesgo más cercana. Para realizar el análisis del factor Criterios estructurales se tienen en cuenta tanto el año de construcción, como la condición de la misma, la cual se evalúa dándole una calificación entre 1 y 5, siendo 1 la peor condición y 5 la óptima.

9.2.1. Albergues de Bucaramanga.

Tabla 3.

Localización de posibles albergues del municipio de Bucaramanga

Albergues Bucaramanga			
Institución educativa para problemas de aprendizaje	Institución Educativa Politécnico SEDE C Margarita Díaz Otero	Instituto Técnico Nacional de Comercio SEDE A	Parque San Francisco
Colegio Del Sagrado Corazón Jesús	Institución Educativa Técnico Empresarial José María Estévez	Institución Educativa José Celestino Mutis	Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA
Institución Educativa Oriente Miraflores Sede B	Instituto Educativo Campo Hermoso SEDE A	Institución Educativa Andrés Páez de Sotomayor	Parque y Canchas Los Naranjos
Parque infantil Provenza	Parque Santander	Parque Romero	Parque Cristo Rey
Institución Educativa Jorge Ardila Duarte SEDE A	Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE B	Institución Educativa Nuestra Señora del Pilar SEDE A	Colegio de Santander SEDE A
Parque García Rovira	Institución Educativa Maipore SEDE B	Institución Educativa Politécnico SEDE A	Estadio Alfonso López
Institución Educativa Liceo Patria	Institución Educativa Camacho Carreño	Parque Mejoras Públicas	Colegio Caldas
Colegio de Santander SEDE C	Institución educativa Aurelio Martínez Mutis	Escuela Normal Superior de Bucaramanga SEDE A	Parque San Pio
Colegio Integrado Nuestra Señora Del Divino Amor	Institución Educativa Las Américas	Parque Las Palmas	Parque de los Niños
Institución Educativa Oriente Miraflores Sede A	Institución Educativa Bicentenario de la Independencia de la República de Colombia	Institución Educativa Técnico Superior Damaso Zapata Sede A	Institución Educativa Nuestra Señora de Fátima Bienestar Social de la Policía
Colegio Café Madrid	Polideportivo La Marte	Colegio La Salle Bucaramanga	Instituto Educativo Centro Piloto Simón Bolívar
Colegio Bilingüe Divino Niño	Coliseo Edmundo Luna	Colegio Gimnasio San Sebastián	Institución Educativa INEM Sede A
Institución Educativa Comuneros	Colegio Metropolitano Real de Minas	Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE A	Universidad Industrial de Santander
Parque de los Leones	Parque Las Estatuas	Parque Antonia Santos	Parque Las Cigarras
Institución Educativa La Libertad	Coliseo Vicente Díaz Romero	Velódromo Alfonso Florez Ortiz	Colegio Militar General Santander
Colegio Incades			

9.2.2. Posibles albergues de San Juan de Girón.

Tabla 4.

Localización de posibles albergues del municipio San Juan de Girón

Albergues Municipio Girón			
Parque natural el gallineral	Colegio San Juan Bosco	Parque Principal de Girón	Capilla Nuestra Señora de las nieves
Liceo Señor de los Milagros	SENA centro industrial de mantenimiento integral	Uniminuto Girón, Colegio Roberto García Sede C	Colegio Luis Carlos Galán Sarmiento Sede C
Colegio Facundo Navas Mantilla	Colegio Roberto García Peña Sede A	Colegio Facundo Navas Mantilla Sede c	Colegio Luis Carlos Galán Sede E Rio Prado
Colegio Juan Cristóbal Martínez	Colegio Nuevos Horizontes	Plazuela de Las Nieves	Registraduría
Colegio Nieves Cortés Picón	Polideportivo Primero de Mayo	Colegio Facundo Navas Sede B	Peralta parque
Iglesia Nazareno	Parque Las Palomas	Colegio Pablo Sexto VI	Canchas El Cocal
Francisco Serrano Muñoz Sede F	Luis Carlos Galán Sarmiento	Instituto Integrado Francisco Serrano Muñoz	Colegio Departamental San Juan de Girón
Hermandad de Jesús Nazaret	Colegio Niño Jesús de Praga	Colegio Facundo Navas Sede D	Cancha del Rincón

9.2.3. Posibles albergues de Piedecuesta.

Tabla 5.

Localización de posibles albergues del municipio de Piedecuesta

Albergues Municipio Piedecuesta			
Centro Recreacional Comfenalco	Hermitaños Eucarísticos	Cancha Quinta Granada	Colegio Balbino García
Escuela Normal Superior	Zoológico De Aves La Fantasía	Colegio Promoción Social	Comunidad de las hermanas capuchinas del valle de umbría
Club Lomas del Viento	Universidad Industrial de Santander Guatiguará	Institución Educativa Carlos Vicente Rey	Colegio Centro De Comercio Sede B
Colegio Cabecera del Llano	Seminario San Alfonso Misioneros Redentoristas	SENA C.A.S.A	Unidad Deportiva Villaconcha
Colegio Centro Pedagógico La Candelaria	Colegio Víctor Félix Gómez Nova	Sede Social Del Seguro	Parque Uribe
Cancha Municipal	Parque La Libertad		

9.2.4. Posibles albergues de Floridablanca.

Tabla 6.

Localización de posibles albergues del municipio de Floridablanca

Albergues Municipio Floridablanca			
Jardín Botánico Eloy Valenzuela	Colegio Santa Isabel de Hungría	Colegio el Carmen	Instituto Pedagógico Santa Ana
Estadio Álvaro Gómez Hurtado	Colegio Vicente Azuero sede B	Instituto Gabriel García Márquez	Instituto Jose Antonio Galán
Parque de la Salud	Colegio Técnico Vicente Azuero Sede C	Colegio Paulo VI	Parque Villabel
Colegio Gonzalo Jiménez Navaz (otra sede)	Colegio Metropolitano Del Sur Sede A	Instituto Rafael Pombo	Cacha de Futbol Molinos
Instituto Santa Teresita	Colegio Ecológico	Instituto Empresarial Gabriela Mistral	Cancha de Fútbol Villabel
Colegio Técnico Industrial Jose Elías Puyana	Parque Principal Floridablanca	Cancha Lagos 3	Pista de Patinaje
Colegio Gonzalo Jiménez Navaz	Instituto Comunitario Minca Sede A	Biblioteca Pública Ciudad Valencia	Cancha de Villa Natalia
Colegio Isidro Caballero Delgado Sede A	Plaza de Toros	Parque La Pera	Parque Jose A Morales
Cancha Múltiple Zapamanga V Etapa	Parque Oasis		

En las tablas anteriores observamos las instalaciones que se pueden adaptar para albergar damnificados en la etapa post-desastre de un desastre natural en el municipio de Bucaramanga y su área metropolitana, estos se evaluaron según sus características, obteniendo una puntuación final para cada alternativa de localización, que determina los lugares más adecuados para utilizarlos como albergues. Para observar las características y puntuaciones finales de los albergues del Municipio de Bucaramanga (*Ver Apéndice E*), para observar las del Municipio de Girón (*Ver Apéndice F*), igualmente las del Municipio de Piedecuesta (*Ver Apéndice G*) y del municipio de Floridablanca (*Ver Apéndice H*).

Se observa en el *Apéndice E* que los mejores lugares para la ubicación de albergues en Bucaramanga son la Universidad Industrial de Santander y la Institución Educativa INEM Custodio García Rovira SEDE A. En el *Apéndice F* se puede ver que la mejor ubicación de un albergue en el municipio de Girón sería el Liceo El Señor de los Milagros, de igual manera en el *Apéndice G* se observa que el lugar con las mejores características en Piedecuesta para adecuarlo como albergue sería el Colegio Víctor Félix Gómez Nova, por último, en el *Apéndice H* se observa que en Floridablanca el mejor lugar para la adecuación de un albergue sería el Jardín Botánico Eloy Valenzuela.

10. Formulación del Modelo

10.1. Objetivo del modelo

El objetivo de éste modelo es minimizar el tiempo de viaje entre los puntos de demanda y los albergues dispuestos para la atención de la misma, y de igual manera, el tiempo que toma acondicionar los lugares dispuestos como posibles albergues.

10.2. Formulación matemática del problema

El modelo matemático a utilizar para el problema de localización y asignación para desastres de inundación y remoción de masas en Bucaramanga y su área metropolitana, está basado en el presentado por Marulanda., et al 2010, con la modificación que este está enfocado en la minimización de los costos y el propuesto para el problema tratado en ésta tesis de grado, está enfocado en la minimización del tiempo total de atención, debido a que se considera que en un problema de Logística Humanitaria, y más si se considera que es un problema que compromete la vida de las personas afectadas, lo Primordial es la atención pronta de sus necesidades.

- Conjuntos:

N = Conjunto de nodos de demanda

M = Conjunto de posibles albergues

- Parámetros

S_j = Capacidad del albergue j (Ver Anexos E, F, G y H)

d_i = Demanda del nodo i

P_j = Ponderación del albergue j (Ver Anexos E, F, G, H)

T_{ij} = Tiempo de realizar un viaje desde el nodo de demanda i al albergue j (Ver Apéndice I)

F = Tiempo que se tarda en adecuar un albergue

- Variables de decisión

$x_{ij} = 1$, si el nodo de demanda i es atendido por el albergue j

$y_j = 1$, si el albergue es habilitado

La formulación matemática se muestra a continuación:

Función objetivo:

$$\text{mín} \sum_{i \in N} \sum_{j \in M} T_{ij} x_{ij} + \sum_{j \in M} F \frac{1}{P_j} y_j \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in M} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} d_i x_{ij} \leq S_j y_j, \quad \forall j \in M \quad (3)$$

$$\sum_{j \in M} S_j y_j \geq \sum_{i \in N} d_i \quad (4)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall j \in M, \forall i \in N \quad (5)$$

$$y_j = \{0,1\} \quad (6)$$

$$x_{ij} = \{0,1\} \quad (7)$$

La ecuación (1), es la encargada de definir el objetivo del problema, que en éste caso es minimizar el tiempo total de atención, y por ende minimizar el tiempo de viaje entre los centros de demanda y los albergues. La ecuación (2) hace que cada centro de demanda sea abastecido por un solo albergue; la ecuación (3) garantiza que el albergue abierto tenga la capacidad suficiente para atender la demanda asignada; la ecuación (4) asegura que el total de los albergues abiertos cubran la totalidad de la demanda. La ecuación (5) indica que para poder atender el nodo

de demanda i se debe abrir un albergue j . Finalmente las ecuaciones (6) y (7) hacen que las variables de decisión sean binarias.

El modelo propuesto tiene en cuenta los siguientes supuestos:

- La cantidad de clientes de un punto de demanda no puede exceder la capacidad de los albergues.
- Un albergue puede suplir a varios puntos de demanda, pero un punto de demanda no puede ser suplido por varios albergues.
- La demanda de los albergues es conocida.
- La capacidad de los albergues potenciales es conocida.
- Las vías entre los puntos de demanda y los albergues no se afectaron por algún desastre.
- La infraestructura de las instalaciones propuestas a servir como albergues no se afectaron por algún desastre.

11. Diseño de los Algoritmos Heurísticos

El problema de Localización-Asignación requiere ser solucionado mediante una herramienta que proporcione una respuesta rápida y eficaz, debido a que es del tipo NP-hard. Por esto se utilizan algoritmos heurísticos, que aunque no proporcionan la respuesta óptima, si encuentran una muy cercana a la misma, en un tiempo considerablemente más corto.

A partir del modelo matemático, cuya función tiene como objetivo la minimización del tiempo de servicio a las personas damnificadas por el desastre, los algoritmos toman la decisión de qué albergues de los pre-seleccionados escoger (*Ver anexos 5, 6, 7 y 8*) y qué puntos de demanda asignarles a estos, teniendo en cuenta, tanto la capacidad de los albergues y la cantidad de demanda en cada nodo.

11.1. Representación de la solución

Los nodos de demanda, representan a los individuos de la población que requieren del recurso, y por ende se les debe asignar un respectivo albergue. Es claro que para atender el

problema se debe seleccionar un número de albergues capaz de alojar la totalidad de los nodos de demanda. De esta manera la solución se construye de dos partes: El estado del albergue y la asignación de los puntos de demanda a su respectivo albergue; ambas representadas por una variable binaria.

El estado del albergue es un vector de M posibles albergues, donde se representa el estado de cada uno de los albergues. Si el albergue j está cerrado, toma un valor de cero en el vector, y de lo contrario toma un valor de 1. (Figura 2)

Albergues

	1	2	3	4	M
Sol. 1	1	0	0	1	1

Figura 2. Representación del estado de los albergues

Igualmente la asignación de los puntos de demanda a los respectivos albergues se representa por una variable binaria que toma valores de 1 si el punto de demanda i es asignado al albergue j , y de lo contrario toma un valor de cero, pero la asignación es una matriz de los posibles M albergues y los N puntos de demanda. (Figura 3)

Asignación de las demandas a los albergues

Sol. 1		1	2	3	4	M
	1	1	0	0	0	0
	2	0	0	1	0	0
	3	0	0	0	0	1
	4	0	1	0	0	0
	N	0	0	0	1	0

Figura 3. Representación de la asignación de albergues

11.2. Función objetivo

La función objetivo en el problema es la suma del tiempo de asignación y el de instalación de los albergues. Entendiendo de esta manera, que el tiempo de asignación es el tiempo que hay desde el punto de demanda al albergue que le fue asignado, y respectivamente el tiempo de

instalación del albergue, que es calculado respecto a la ponderación que recibe cada posible albergue de acuerdo a una previa evaluación de sus condiciones para su acondicionamiento.

Para la selección de los posibles albergues a ubicar, se usa un algoritmo heurístico para escoger los posibles albergues a asignar, y posteriormente se asignan las demandas respectivas.

11.3. Pasos lógicos de los algoritmos

Primero: Se realiza la selección de los albergues a habilitar para satisfacer la demanda, usando un algoritmo heurístico (sea, Ardalan, Prim o Kruskal). Es aquí donde se crea la primera lista de albergues a habilitar.

Segundo: Una vez el algoritmo define con el método heurístico una cantidad x de albergues a habilitar, se da inicio a la etapa de asignación, donde se va a escoger el albergue más cercano a cada uno de los puntos de demanda, para atender dicho punto. Cabe resaltar que en ésta etapa, no se tiene en cuenta la capacidad de cada uno de los albergues, por lo cual, la asignación que se obtiene en ésta etapa, no necesariamente debe ser acertada.

Tercero: En esta etapa se realiza la comprobación de las restricciones del modelo, y de igual manera, los ajustes correspondientes para realizar la asignación de forma adecuada. En esta fase, se verifica que cada uno de los albergues tenga capacidad suficiente para alojar las demandas que le han sido asignadas en la fase anterior, basados igualmente en la reducción de los tiempos.

Cuarto: Por último se verifica que cada punto de demanda tenga asignado un albergue y en caso de no tener capacidad con los albergues seleccionados inicialmente, se procederá a añadir los albergues necesarios para suplir la demanda en su totalidad.

La solución del problema es la localización de los albergues que van a ser utilizados y la asignación de los respectivos puntos de demanda a cada uno de los albergues. Cabe resaltar que en éste trabajo se plantea la búsqueda de la solución, mediante la aplicación de tres heurísticos, con el fin de comparar los resultados obtenidos variando el método heurístico. A continuación, en las figuras 4, 5 y 6, se representa gráficamente la secuencia del algoritmo con el heurístico utilizado.

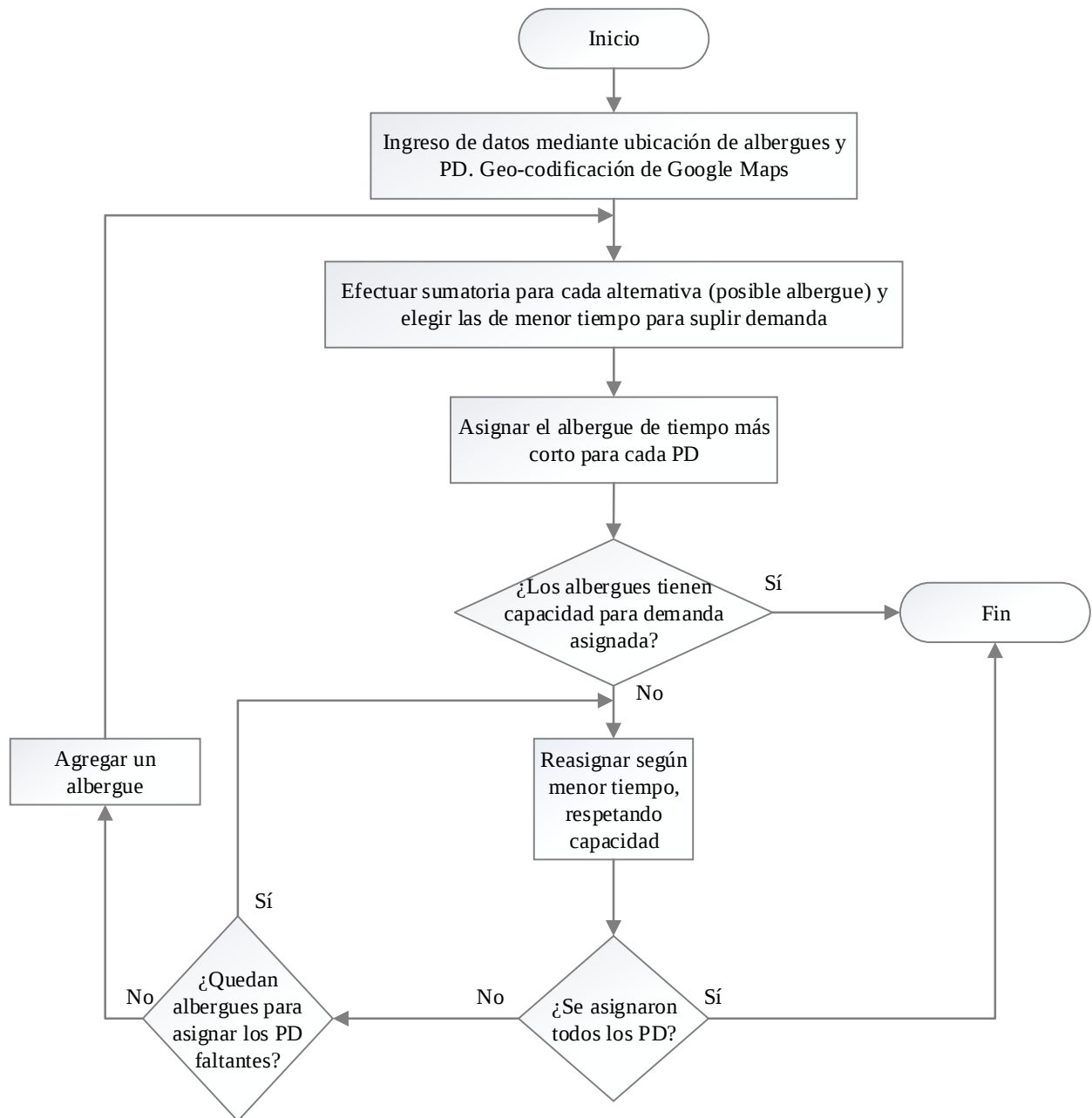


Figura 4. Representación del proceso con el algoritmo heurístico de Ardalan

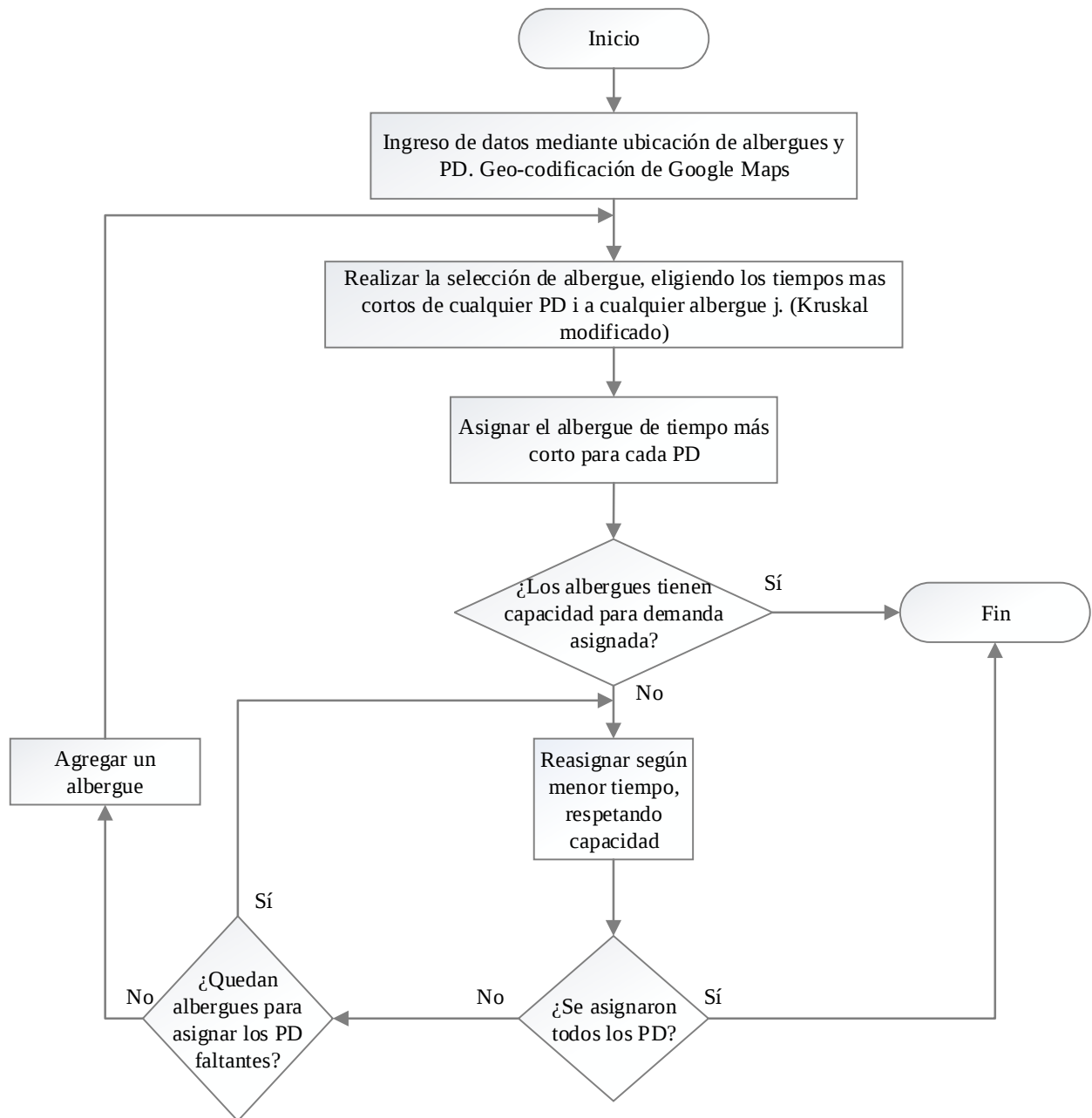


Figura 5. Representación del proceso con el algoritmo heurístico de Kruskal

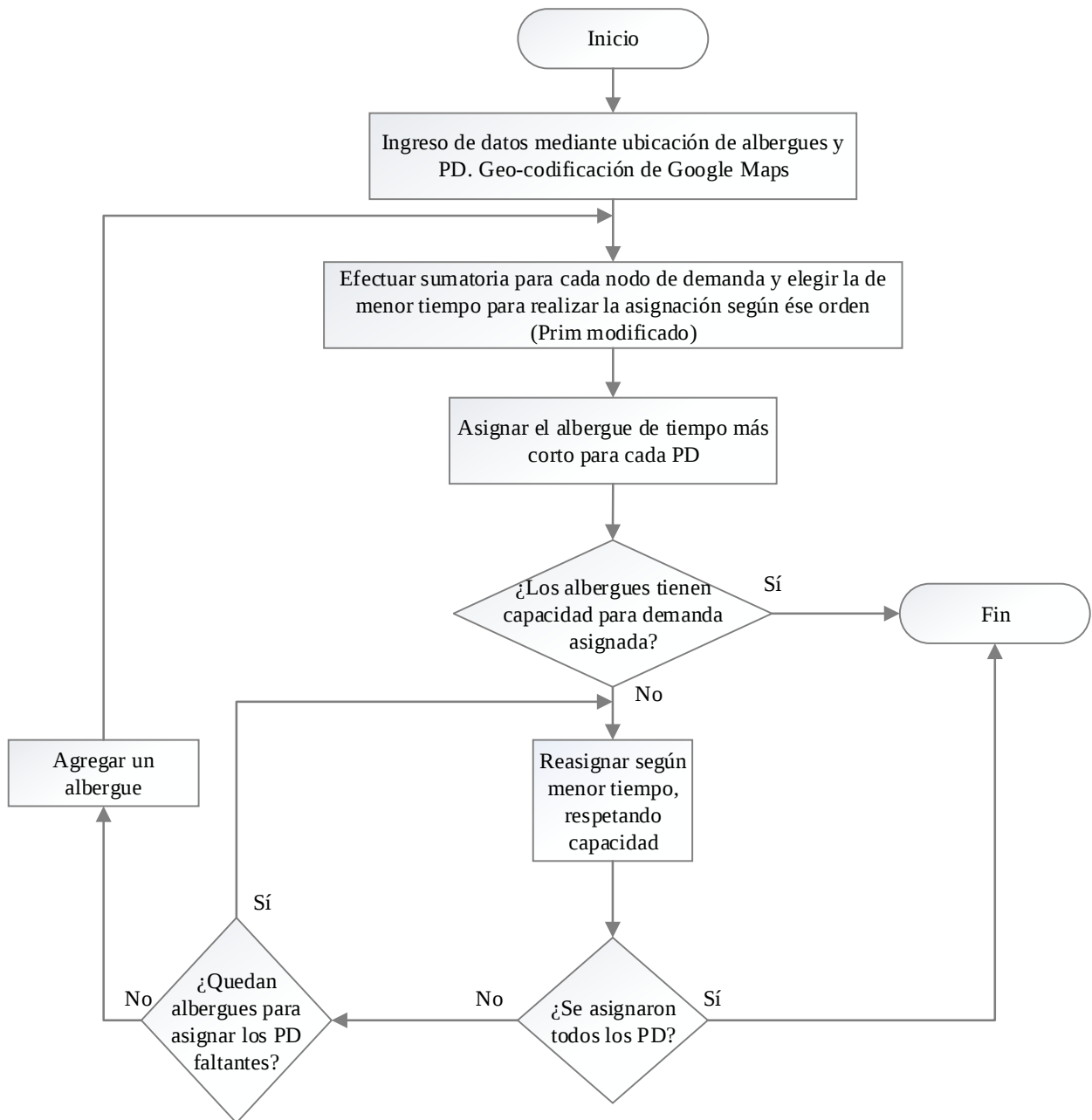


Figura 6. Representación del proceso con el algoritmo heurístico de Prim

12. Instancias

Para verificar la eficiencia de la herramienta, las instancias a evaluar son las encontradas en Sobolev Institute of Mathematics, disponibles para problemas de “Capacitated Facility Location

Problem”, que es el problema propuesto en este estudio. Se evaluarán 8 instancias con diferentes números de clientes y ubicaciones de plantas para localizar.

12.1. Validación de los algoritmos

Las instancias utilizadas tienen 4 variaciones en la matriz de origen-destino entre los clientes y las instalaciones, igualmente las demandas de cada uno de los clientes, así mismo se prueban en 2 escenarios en los cuales varía la capacidad de las instalaciones; tomando valores de 20 y 30. Como el CFLP es un problema basado en la minimización de costos, en estas instancias se asignan valores de costo fijo por instalación. Cabe resaltar que el problema de estudio se enfoca en minimizar los tiempos de servicio, por lo cual se asigna una ponderación a cada una de las posibles instalaciones, pues los tiempos de habilitar un albergue pueden variar de acuerdo a las condiciones de la infraestructura de cada instalación propuesta, sin embargo, para probar las instancias, el valor del costo fijo no se afectó con ninguna ponderación, para no afectar los resultados obtenidos con el problema propuesto.

En las tablas que se encuentran a continuación se observan los resultados obtenidos de las instancias code 1, code 5, code 15 y code 20, con los Algoritmos Heurísticos, la solución óptima y la comparación entre las mismas, la cual se analiza con un porcentaje de brecha o GAP.

Tabla 7.

Comparación de resultados obtenidos mediante Heurístico Ardalan

Problema	Capacidad	Óptimo	Ardalan	Albergues habilitados	GAP
code 1	20	2110.839	2927.24	86,6,63,0,12,43,65,54,26,33,37,99,0,47,66,1,29,4,5,32,13,27,85,79,81,21,44	39%
	30	1923.900	2278.2	86,6,63,0,12,43,65,54,26,33,37,99,0,47,66,1,29	18%
code 5	20	2145.423	2961.87	28,9,24,18,3,18,17,6,26,14,4,15,2,69,4,7,5,35,34,38,9,76,47,63,25,26,8,22,1	38%
	30	1942.800	2304.47	28,9,24,18,3,18,17,6,26,14,4,15,2,69,4,7,5	19%
code 10	20	2216.789	2966.98	0,1,2,3,4,5,6,7,10,11,14,15,16,17,33,54	34%
	30	2026.500	2428.3	0,2,4,5,6,7,8,9,20,33,42	20%
code 15	20	2156.231	2953.5	0,2,3,4,5,6,7,9,10,11,13,14,15,17,18,19,20,27,30,70	37%
	30	1944.900	2344.67	0,1,2,4,5,6,7,8,27,30,60,77	21%

Tabla 8.

Comparación de resultados obtenidos mediante Heurístico Kruskal modificado

Problema	Capacidad	Óptimo	Kruskal	Albergues habilitados	GAP
code 1	20	2110.839	2901.62	9,0,14,17,76,3,11,38,35,47,7,8,1,2,30,13,14,9,2,35,38,13,6,3,30	37%
	30	1923.900	2146.18	9,0,14,17,76,3,11,38,35,47,7,8,1,2,30,13	12%
code 5	20	2145.423	2916.435	24,61,83,76,94,6,22,27,3,9,19,14,8,5,92,75,21,7,2,18,26,37,70,49,28,12,83,4	36%
	30	1942.800	2209.342	24,61,83,76,94,6,22,27,3,9,19,14,8,5,92,75,21,7,2,18	14%
code 10	20	2216.789	3008.87	0,4,6,7,8,14,35,46,49,50,60,61,63,70,71,73,84,91	36%
	30	2026.500	2269.9	0,4,5,6,7,8,41,46,50,53,55,63,70,,84,91	12%
code 15	20	2156.231	2947.96	0,2,5,7,9,20,38,39,42,45,57,60,61,66,68,83,87,92,99	37%
	30	1944.900	2210.1	0,1,2,7,8,9,20,38,39,42,45,60,62	14%

Tabla 9.

Comparación de resultados obtenidos mediante Heurístico Prim modificado

Problema	Capacidad	Óptimo	Prim	Albergues habilitados	GAP
code 1	20	2110.839	2687	14,9,0,17,38,47,4,11,2,76,15,63,30,8,6,12,5,86,6,63,0,12,42	27%
	30	1923.900	2240.88	14,9,0,17,38,47,4,11,2,76,15,63,30,8	16%
code 5	20	2145.423	2736.205	28,9,24,18,3,18,17,6,26,14,4,15,2,6,9,47,5,35,34,38,9,76,47,63,25,26,8,22,19,27,19,0	28%
	30	1942.800	2242.295	28,9,24,18,3,18,17,6,26,14,4,15,2,6,9,47,5,35,34	15%
code 10	20	2216.789	2841.34	0,1,2,3,4,5,6,8,11,13,14,16,17,18	28%
	30	2026.500	2349.4	0,1,3,4,6,8,11,14,17,18	16%
code 15	20	2156.231	2739.6	0,1,2,3,4,7,8,9,10,12,13,14,17,18,20,25,26,28	27%
	30	1944.900	2276.6	0,1,3,4,7,8,9,10,11,13,18,26	17%

Cada problema se corre una vez en un algoritmo implementado en Python versión 3,6. En un equipo con procesador Intel® Core™ i3-4005U CPU Q@ 1,70 GHz, con memoria RAM de 4,00 GB y sistema operativo de 64 bits, procesador x64. El código de programación de los Algoritmos Heurísticos se encuentra en el Anexo J.

Se puede observar en los resultados que las respuestas obtenidas por los diferentes algoritmos propuestos, tienen un comportamiento normal, respecto a la variación de la capacidad, pues al aumentar la misma, se obtienen respuestas más cercanas al óptimo. En general se puede apreciar que los algoritmos propuestos arrojan una respuesta aceptable, pues son algoritmos heurísticos que ofrecen respuestas en tiempos muy cortos.

Realizando una comparación entre las respuestas obtenidas por los 3 algoritmos heurísticos, se puede observar que en la mayoría de las instancias la mejor solución se obtiene mediante el algoritmo de Kruskal modificado, seguido del algoritmo basado en Prim. Por último, la tercera mejor solución se obtiene mediante el algoritmo basado en Ardalan, sin embargo las tres respuestas se pueden considerar aceptables para el tratamiento del problema y bastante útiles para la aplicación en casos de emergencia, pues los tres algoritmos encuentran respuestas en tiempos muy cortos.

13. Aplicación del Algoritmo al Caso de Estudio

Para implementar el modelo propuesto, se lleva a cabo el caso de estudio de Localización de instalaciones y Asignación de recursos, para la atención post-desastre, en caso de inundación o remoción de masa, para el municipio de Bucaramanga y su área metropolitana.

13.1. Levantamiento de la información

Para la construcción de los mapas se usó el sistema de información geográfica proporcionado de Google Maps, que permite realizar el trazado de las zonas de riesgo, la geo-localización de los albergues y los nodos de demanda, el análisis de la red de corredores viales, el sentido de circulación de las vías, las distancias entre nodos y albergues y los tiempos estimados entre posibles albergues y nodos de demanda.

13.2. Análisis de la información (Mapas)

Una vez condensada la información en los mapas mediante la herramienta Google My Maps, se procede a la ubicación de los posibles albergues que potencialmente tendrían disponibilidad para atender la emergencia, y así mismo se señalan los lugares en los que se espera que se concentre la demanda por encontrarse en zonas vulnerables al siniestro. En la figura 7 se indica la simbología utilizada para representar los posibles albergues y los nodos de demanda identificados. En la figura 8, se muestra el mapa del municipio de San Juan de Girón con los albergues, zonas de riesgo y nodos de demanda identificados.

Lugar	Símbolo
Albergue	
Punto de demanda	

Figura 7. Simbología de instalaciones en los mapas

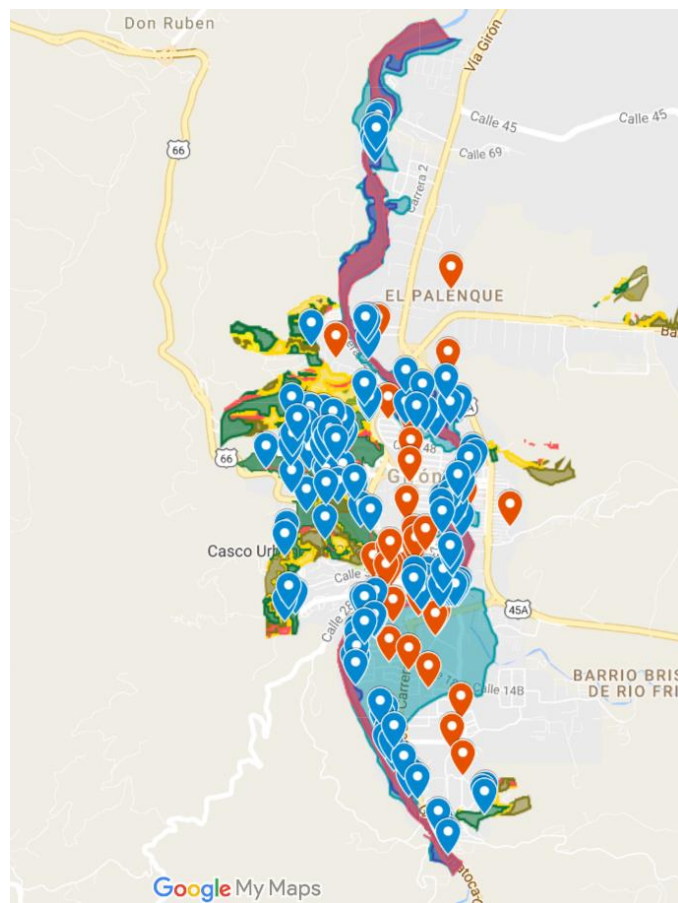


Figura 8. Mapa del municipio de Girón con identificación de albergues y Puntos de demanda

16.1.**16.2.****16.2.1. Albergues.**

Una vez identificadas las instalaciones de interés, se procede a analizar las características de los albergues potenciales, entre estas su área, para calcular la capacidad de albergar posibles damnificados, y además para otorgarles una puntuación, la cual interviene en el modelo matemático propuesto.

16.2.2. Puntos de demanda.

Los puntos de demanda se modifican del trabajo realizado por Barrera y Hernández (2015), teniendo en cuenta únicamente los que se encuentran en zonas de riesgo de inundación o remoción de masa, según el interés de la presente investigación.

16.3. Casos de Estudio

La aplicación de los diferentes casos de estudio, se realiza en un escenario pesimista, es decir, suponiendo que ocurren múltiples desastres, en todas las zonas identificadas de riesgo, y que todas las personas que viven en estas zonas (Número de personas de los puntos de demanda) necesitan albergue temporal.

16.4.**16.4.1. Caso de estudio N°1: Bucaramanga**

En la tabla 10 se observan los resultados obtenidos mediante los diferentes algoritmos, para el municipio de Bucaramanga; se observa el tiempo total de servicio y los albergues que se deberían habilitar según cada algoritmo, el número de albergue pertenece a una instalación, la cual se puede observar en el apéndice E.

La demanda para este caso tiene un total de 38.722 personas, los albergues potenciales disponibles para atender la demanda son 61, con una capacidad total de 77.073.

Se observa que el Algoritmo de Kruskal es el más indicado para la solución del problema, debido a que el tiempo total de servicio a las personas damnificadas del escenario propuesto sería de 134,0467 horas, además se necesita un menor número de albergues para atender toda la demanda.

Tabla 10.

Resultados caso de estudio N°1 Bucaramanga

Bucaramanga				
Heurística	Tiempo total [min]	Tiempo total [h]	Número de albergues	Albergues abiertos
Ardalan	8832.5218	147.2087	56	[0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,37,38,39,40,41,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,59]
Prim	8468.2854	141.1381	52	[0,4,5,7,8,10,11,13,14,15,16,17,18,19,20,22,23,24,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,53,54,55,56,57,58,59,60]
Kruskal	8042.8034	134.0467	44	[0,1,4,5,8,10,11,12,14,15,16,17,20,22,23,24,26,27,28,29,30,31,32,33,35,36,37,38,39,41,42,43,44,46,47,50,51,52,53,56,57,58,59,60]

El tiempo que demora el algoritmo en dar respuesta es muy corto, para este caso, el más demorado fue con el Heurístico de Ardalan, el cual demora 36,71 segundos; factor fundamental en casos de emergencia.

16.4.2. Caso de estudio N°2: San Juan de Girón

En la tabla 11 se observan los resultados obtenidos mediante los diferentes algoritmos, para el municipio de San Juan de Girón; se observa el tiempo total de servicio y los albergues que se deberían habilitar según cada algoritmo, el número de albergue pertenece a una instalación, la cual se puede observar en el apéndice F.

La demanda para este caso tiene un total de 16.480 personas, los albergues potenciales disponibles para atender la demanda son 32, con una capacidad total de 48.570.

Se observa que el Algoritmo de Kruskal es el más indicado para la solución del problema, debido a que el tiempo total de servicio a las personas damnificadas del escenario propuesto sería de 23.8167 horas, el cual se encuentra bastante cercano a la respuesta que arroja Prim, que es de

25.3932 horas, sin embargo se necesita un menor número de albergues para atender toda la demanda mediante el algoritmo de Kruskal, aspecto importante a la hora de analizar los costos de las diferentes alternativas.

Tabla 11.

Resultados caso de estudio N°2 San Juan de Girón

San Juan de Girón				
Heurística	Tiempo total [min]	Tiempo total [h]	Número de albergues	Albergues abiertos
Ardalan	1870.5451	31.1758	24	[0,1,2,3,4,5,7,8,10,11,14,18,20,21,22,23,24,25,26,27,30,31]
Prim	1523.5935	25.3932	16	[2,3,6,7,8,10,11,14,15,16,19,24,26,27,29,30]
Kruskal	1429.0039	23.8167	8	[3,4,8,15,19,25,27,31]

16.4.3. Caso de estudio N°3: Piedecuesta

En la tabla 12 se observan los resultados obtenidos mediante los diferentes algoritmos, para el municipio de San Juan de Girón; se observa el tiempo total de servicio y los albergues que se deberían habilitar según cada algoritmo, el número de albergue pertenece a una instalación, la cual se puede observar en el apéndice G.

La demanda para este caso tiene un total de 20.165 personas, los albergues potenciales disponibles para atender la demanda son 22, con una capacidad total de 72.164.

Se observa que el Algoritmo de Prim es el más indicado para la solución del problema, debido a que el tiempo total de servicio a las personas damnificadas del escenario propuesto sería de 20.2303 horas, y el número de albergues que requiere es de 7, en comparación con Ardalan y Kruskal, que necesitan de 16 y 17 albergues respectivamente.

Tabla 12.

Resultados caso de estudio N°3 Piedecuesta

Piedecuesta				
Heurística	Tiempo total [min]	Tiempo total [h]	Número de albergues	Albergues abiertos

Ardalan	1626.2391	27.1040	16	[0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,16]
Prim	1213.8167	20.2303	7	[1,2,3,4,7,8,13]
Kruskal	1520.8770	25.3479	17	[0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,11,12,13,14,16,20,21]

16.4.4. Caso de estudio N°4: Floridablanca

En la tabla 12 se observan los resultados obtenidos mediante los diferentes algoritmos, para el municipio de Floridablanca; se observa el tiempo total de servicio y los albergues que se deberían habilitar según cada algoritmo, el número de albergue pertenece a una instalación, la cual se puede observar en el apéndice H.

La demanda para este caso tiene un total de 20.979 personas, los albergues potenciales disponibles para atender la demanda son 34, con una capacidad total de 53.730.

Se observa que el Algoritmo de Kruskal es el más indicado para la solución del problema, debido a que el tiempo total de servicio a las personas damnificadas del escenario propuesto sería de 45.1380 horas, aunque es muy cercano al que arroja el algoritmo de Prim, que es de 46.6932 horas, el número de albergues que requiere es mucho menor al de los otros dos algoritmos.

Tabla 13.

Resultados caso de estudio N°3 Floridablanca

Floridablanca				
Heurística	Tiempo total [min]	Tiempo total [h]	Número de albergues	Albergues abiertos
Ardalan	2967.1634	49.4527	35	[1,3,4,5,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,20,25,27,28,29,30,31,33,39,40,41,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52]
Prim	2801.5930	46.6932	32	[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,17,18,20,22,25,27,28,29,30,31,33]
Kruskal	2708.2775	45.1380	27	[2,3,4,5,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,31,32,33]

El tiempo que tardan los algoritmos en proporcionar la respuesta de tiempo total y albergues habilitados es muy corto; van en un rango entre 2,18 y 36,71 segundos, lo cual es un aspecto

fundamental, debido a que en casos de ocurrencia de desastre se necesitan herramientas rápidas, para poder hacer frente al mismo, y suplir las necesidades de la población afectada lo antes posible.

Conclusiones

- Los objetivos planteados para la investigación “Localización de instalaciones y asignación de recursos mediante un algoritmo heurístico, para la atención post-desastre, en caso de inundación o remoción de masa” se cumplieron a cabalidad; la herramienta desarrollada proporciona resultados aceptables, para la solución del problema.
- Aunque los planes de emergencia son una herramienta fundamental para dar respuesta ante la ocurrencia de un desastre, los municipios de Bucaramanga y su área metropolitana no cuentan con los mismos.
- Se encuentra poca información en medios digitales para la identificación exacta de zonas de alto riesgo en los diferentes municipios, lo cual se convierte en una dificultad para la realización de investigaciones con temas relacionados a desastres naturales.
- Pese a que el número de ocurrencia de desastres en todo el mundo ha venido en aumento, en Colombia no se han desarrollado muchas investigaciones del tema de Logística humanitaria; en la revisión de la literatura se encontró únicamente un artículo de una universidad del país relacionado con el problema de localización y asignación, lo cual es un aspecto preocupante.
- Los algoritmos heurísticos no proporcionan respuestas tan buenas como los algoritmos metaheurísticos, no obstante, sí suministran respuestas aceptables, en tiempos muy cortos, incluso para problemas de tipo NP-hard.

- Es fundamental contar con herramientas para la planeación y ejecución de respuestas que contribuyan a suplir las necesidades rápidamente de las personas afectadas por algún desastre.
- Aunque en la mayoría de investigaciones encontradas, la función objetivo del modelo propuesto está enfocada a la minimización de costos, se considera aún más relevante la minimización del tiempo de servicio a los damnificados, debido a que muchas veces son casos de vida o muerte.
- Comparando los tres algoritmos propuestos, se observa que el que proporciona las respuestas más adecuadas al problema; es decir, menor tiempo de respuesta y menor cantidad de albergues es el algoritmo de Kruskal modificado.
- Los códigos de programación de los algoritmos sirven como herramientas computacionales para la planeación y toma de decisiones en la ocurrencia de desastres.

Recomendaciones

- Complementar los casos de estudio analizados, con la solución de otros problemas que se derivan de la ocurrencia de desastres naturales, como el de ruteo entre puntos de demanda y albergues.
- Darle continuidad a la investigación realizada, haciendo uso de metaheurísticas, que optimicen las respuestas al problema planteado.
- Para futuras investigaciones se recomienda darle mayor flexibilidad al modelo, permitiendo que las personas de un nodo de demanda, puedan repartirse entre múltiples albergues; aspecto que permitirá ocupar el espacio subutilizado de los albergues, reduciendo costos y tiempos de transporte.

- Incentivar en las universidades proyectos que aborden y ofrezcan herramientas de solución a los problemas relacionados con la logística humanitaria, ya que, como se observó en la investigación, son pocos los proyectos encontrados de este tema, provenientes de universidades Colombianas.
- Hacer uso de la información recolectada en este proyecto para futuros proyectos de investigación; albergues potenciales, puntos de demanda, matrices de tiempo, caracterización de albergues y mapas de los municipios con zonas de riesgo identificadas.
- Realizar un análisis con mayor rigurosidad de las características de los albergues, como condiciones de las vías de acceso a los mismos y estado de la construcción de las instalaciones; aspectos que deben ser estudiados por expertos en el tema, para una mayor precisión a la hora de habilitar dichas instalaciones para albergar damnificados.

Referencias Bibliográficas

- Akgün, T., Gümüşbuğa, F., & Tansel, B. (2015). Risk based facility location by using fault tree analysis in disaster management. *Omega (United Kingdom)* 52, 168–179.
- Altay, N. Capability-based resource allocation for effective disaster response. (2013). *IMA J. Manag. Math.* 24, 253–266.
- Aman, A., Bakhtiar, T., Hanum, F., & Supriyo, P. (2012). OR/MS Applications in Mt. Merapi Disaster Management. *J. Math. Stat.* 8, 264–273.
- Apte, A. (2009). Humanitarian logistics: A new field of research and action. Found. *Trends Technol. Inf. Oper. Manag.* 3, 1–100.
- Bai, X. (2016). Two-Stage Multiobjective Optimization for Emergency Supplies Allocation Problem under Integrated Uncertainty. *Math. Probl. Eng.*
- Balcik B., Beamon B., & Smilowitz K. (2008). Last mile distribution in humanitarian relief. *J Intelligent Transp Syst Technol Plan Oper.* 12(2), 51-63.
- Banco Mundial Colombia y Global Facility for Disaster Reduction and Recovery. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia*. Bogotá, Colombia. Primera edición.
- Baquela, E. G., y Redchuck, A. (2013). Optimización Matemática con R, I. 153.
- Barreto, M. y Niño, P. (2016). *Un algoritmo memético para el problema de localización-ruteo con ventanas de tiempo para la atención de desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga*. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander.
- Barrera y Hernández (2015). *Un algoritmo evolutivo para el problema de distribución de recursos postdesastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga*. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander.
- Barzinpour, F. & Esmaeili, V. (2014). A multi-objective relief chain location distribution model for urban disaster management. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 70, 1291–1302.
- Barzinpour, F., Saffarian, M., Makoui, A. & Teimoury, E. (2014). Metaheuristic algorithm for solving biobjective possibility planning model of location-allocation in disaster relief logistics. *J. Appl. Math.*
- Başar, A., Çatay, B. & Ünlüyurt, T. (2012). A taxonomy for emergency service station location problem. *Optim. Lett.* 6, 1147–1160.

- Basu, S., Sharma, M., & Ghosh, P. (2015). Metaheuristic applications on discrete facility location problems: a survey. *Opsearch*.
- Blum, C., & Roli, A., (2008). Metaheuristic in combinatorial Optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 35(3), 268.
- Bosque Sendra J. (1992) Sistemas de información geográfica. Rialp. Madrid, España.
- Bosque Sendra, J., y Franco Maass, S. (1995). Modelos de localización - asignación y evaluación multicriterio para la localización de instalaciones no deseables. *Ser. Geográfica* 5, 97–112
- Bozorgi-Amiri, A., & Asvadi, S. (2015). A prioritization model for locating relief logistic centers using analytic hierarchy process with interval comparison matrix. *Knowledge-Based Syst.*
- Bozorgi-Amiri, A., Jabalameli, M. S., & Mirzapour Al-e-Hashem, S. (2013). A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty. *OR Spectr.* 35, 905–933.
- Campbell, A. M., & Jones, P. C. (2011). Prepositioning supplies in preparation for disasters. *Eur. J. Oper.*, 209, 156–165.
- Campos, L. (2012). Gestión del riesgo de desastres en Colombia. 438.
- Centro Regional de Información sobre desastres para América Latina y El Caribe. (2012). Boletín Actualidad
- CEPAL. (2005). El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: documento metodológico básico para estudios nacionales de caso. 6-26.
- Chen, A., Peña, F., & Ouyang, Y. (2011). A collaborative GIS framework to support equipment distribution for civil engineering disaster response operations. *Autom. Constr.*, 20, 637–648.
- Chicano, J. F. (2007). Metaheurísticas e Ingeniería del Software. Tesis doctoral. Universidad de Málaga, *Lenguajes y ciencias de la computación*, 46.
- CLOPAD. (2011). Caracterización general de escenarios de riesgo de Bucaramanga, Bucaramanga, Santander.
- CMGRD. (2013). Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastre, PMGRD de Bucaramanga, Bucaramanga, Colombia.

- Congreso de Colombia. (2012). Gestión del riesgo, responsabilidad, principios, definiciones y Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. 2012. LEY No.1523. Capítulo 1.
- Cooper, L. (1963), Location-allocation problems. *Operational Research*, 11, 331-344.
- D'iez, R. P., Gómez, A. G. & de Abajo Martínez, N. (2001) *Introducción a la inteligencia artificial: sistemas expertos, redes neuronales artificiales y computación evolutiva*. Servicio de Publicaciones, Universidad de Oviedo.
- Das, R., & Hanaoka, S. (2014). An agent-based model for resource allocation during relief distribution. *J. Humanit. Logist. Supply Chain Manag.* 4, 265–285.
- Dirección General de Protección Civil. (2013). *Guía práctica para la planificación, montaje y coordinación de albergues temporales*, Ministerio de Gobernación. Comisión Técnica Sectorial de Albergues, El Salvador.
- Federación Internacional de la Cruz Roja y la Media Luna Roja. (2008). Manejo de albergues temporales. Educación Comunitaria para la Prevención de Desastres.
- Fereiduni, M. & Shahanaghi, K. (2016). A robust optimization model for blood supply chain in emergency situations. *Int. J. Ind. Eng. Comput.*
- Fetter, G., & Rakes, T. (2011). A self-balancing CUSUM approach for the efficient allocation of resources during post-disaster debris disposal operations. *Oper. Manag.* 4, 51–60.
- Fogel, Lawrence. (1962). Autonomous Automata. *Industrial Research*, 4(2), 14-19.
- Frederick, S. (1997). Introducción a la Investigación de Operaciones. *Introd. a la Investig. Operaciones*, 1–164.
- Gilli, M.; Winker, P. (2007, 21 de Octubre). Heuristic Optimization Methods in Econometrics. Université de Genève. 48.
- Glover F., & Kochenberger. G. (2003). *Handbook of Metaheuristics*; Boston, United States.
- González, M. G. (2008). Técnicas Metaheurísticas. Algoritmos Basados En Nubes De Partículas. Sist. Generación eléctrica con pila Combust. Óxido sólido Aliment. con residuos For. y su Optim. Median. Algoritm. Basados en nubes partículas, 39–64.
- Guerequeta, R., y Vallecillo, A. (1998). *Técnicas de Diseño de Algoritmos*. Universidad de Málaga, España.

- Hamalainen, Wilhemiina. (2016). Class NP, NP-complete, and NP-hard problems. Recovered from <http://cs.joensuu.fi/>
- Han, Y., Guan, X., & Shi, L. (2011). Optimization based method for supply location selection and routing in large-scale emergency material delivery. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng*, 8, 683–693.
- Hasanzadeh, H. & Bashiri, M. (2016). An efficient network for disaster management, Model and solution. *Appl. Math. Model.* 40, 3688–3702.
- Hillier, Frederick S., Lieberman, Gerald J. (2010). Introducción a la investigación de operaciones. Ciudad de México, México. 9° Ed. Mc Graw Hill, 81-88.
- Holguín-Veras, J., Pérez, N., Jaller, M., Van Wassenhove, L. N., & Aros-Vera, F. (2013). On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics models. *J. Oper. Manag.*
- Hoyos, M. C., Morales, R. S., & Akhavan-Tabatabaei, R. (2015). OR models with stochastic components in disaster operations management, *A literature survey. Comput. Ind. Eng.*
- Huertas, G. R., y Domínguez, G. R. (2015). Decisiones estratégicas para la dirección de operaciones en empresas de servicios y turísticas. Barcelona, España. Publicaciones y ediciones de la Universidad de Barcelona.
- In Pelegrín, P. B. (2004). Avances en localización de servicios y sus aplicaciones. Murcia. Universidad de Murcia.
- J., J., Langley, C., A., R., J., B. (2013). Administración de la Cadena de Suministro, 9a. ed. Cengage Learning, 62.
- Joyanes, L. (2005). Estructura de datos en C. Madrid, España. McGraw.Hill.
- Kaufman, D. W., & Kelly, J. P. (2001). International Case-Control Study of Severe Cutaneous Adverse Reactions. Acetylsalicylic acid and other salicylates in relation to Stevens–Johnson syndrome and toxic epidermal necrolysis. *British Journal of Clinical Pharmacology*, 51(2), 174–176.
- Lauras, M., Vargas, J., Dupont, L. & Charles, A. (2014). A location-allocation model for more consistent humanitarian supply chains. *Lect. Notes Bus*, 196, 1–12.
- Ley N° 29664. Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Colombia, 2011.
- Marek L. (2010). A note on robustness tolerances for combinatorial optimization problems. *Information Processing Letters*, 110. 725-729.

- Marsh, M. T., & Schilling, D. A. (1994). Equity measurement in facility location analysis: A review and framework. *European Journal of Operational Research*, 74(1), 1-17.
- McCoy, J. H., & Lee, H. L. (2014). Using fairness models to improve equity in health delivery fleet management. *Prod. Oper. Manag.*
- Moreno, A., Alem, D., & Ferreira, D. (2016). Heuristic approaches for the multiperiod location-transportation problem with reuse of vehicles in emergency logistics. *Comput. Oper. Res.*
- Moujahid, A., & Inza, I. (2008). Algoritmos genéticos. *Metod. Mat. en Ciencias la Comput.*, 1–34.
- Muñoz, A. D. (2007). *Metaheurísticas*. Editorial Dykinson.
- Nier, A., y Niño, J. (2015). Desarrollo de un algoritmo híbrido para resolver el problema de localización-ruteo (LRP). Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander.
- Paul, J. A. & MacDonald, L. (2016). Optimal location, capacity and timing of stockpiles for improved hurricane preparedness. *Int. J. Prod. Econ.*
- Paul, J. A., & MacDonald, L. (2016). Location and capacity allocations decisions to mitigate the impacts of unexpected disasters. *Eur. J. Oper. Res.*
- Pérez, M., y Sancho, F. (2003). Maquinas moleculares basadas en ADN. Universidad de Sevilla. España. Recuperado de: <http://goo.gl/TNprv/>.
- Plan básico de ordenamiento territorial del municipio de Piedecuesta, Concejo Municipal, 18 Diciembre de 2003.
- Plan de ordenamiento territorial (POT) del municipio de San Juan Girón, Concejo Municipal, 30 Noviembre de 2010.
- Plan de Ordenamiento Territorial de Floridablanca 2000-2009. Diagnóstico. Centro de Estudios Regionales – UIS.
- Pradhananga, R., Mutlu, F., Pokharel, S., Holguín-Veras, J. & Seth, D. (2016). An integrated resource allocation and distribution model for pre-disaster planning. *Comput. Ind. Eng.*
- Pradhananga, R., Mutlu, F., Pokharel, S., Holguín-Veras, J., & Seth, D. (2016). An integrated resource allocation and distribution model for pre-disaster planning. *Comput. Ind. Eng.*

- Rath, S., Gendreau, M. & Gutjahr, W. J. (2016). Bi-objective stochastic programming models for determining depot locations in disaster relief operations. *Int. Trans. Oper. Res.*
- Redacción Nacional. (2009). Los 10 desastres naturales que marcaron el país. Vanguardia liberal.
- Reeves, C. (2010). Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems. An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods. *Journal of King Saud University*, 22, 126 -127.
- Rennemo S, Ro K, Hvattum L, y Tirado G. A. (2014). Three stage stochastic facility routing model for disaster response planning. *Transp Res Part E Logist Transp*; 62, 35-115.
- Reyes Rubiano, L., & Quintero Araujo, C. (2015). Localización de instalaciones y ruteo de personal especializado en logística humanitaria post-desastre - caso inundaciones. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander.
- Rezaei-Malek, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Bozorgi-Amiri, A. (2016). An interactive approach for designing a robust disaster relief logistics network with perishable commodities. *Comput. Ind. Eng.*
- Rios, R., y Gonzáles, J. (2000). Investigación de Operaciones en Acción: Heurísticas para la Solución del TSP, 3. Universidad Autónoma de Nuevo León
- Safeer, M. (2014). Analyzing transportation and distribution in emergency humanitarian logistics. *Elsevier science Ltd*, 97, 2248-2258.
- Salman, F. S., & Gül, S. (2014). Deployment of field hospitals in mass casualty incidents. *Comput. Ind. Eng.* 74, 37–51.
- Salmerón, J., & Apte, A. (2010). Stochastic optimization for natural disaster asset prepositioning. *Prod. Oper. Manag.* 19, 561–574.
- Schryen, G., Rauchecker, G., & Comes, T. (2015). Resource Planning in Disaster Response: Decision Support Models and Methodologies. *Bus. Inf. Syst. Eng.*
- Shafia M., & Rahmaniani R. A. (2013). Study on maximum covering transportation network design with facility location under uncertainty. *J Ind Prod Eng*, 30(2),78-93.
- Sobolev Institute of Mathematics, Benchmarks for The Capacitated Facility Location Problem. Recovered from <http://www.math.nsc.ru/AP/benchmarks/english.html>

- Taha, H. (2012). *Investigación de Operaciones*. Carolina del Norte, EEUU, Pearson.
- Talarico, L., Meisel, F., & Sörensen, K. (2015). Ambulance routing for disaster response with patient groups. *Comput. Oper. Res.* 56, 120–133.
- Talarico, L., Meisel, F., & Sörensen, K. (2015). Ambulance routing for disaster response with patient groups. *Comput. Oper. Res.* 56, 120–133.
- Thomas, A. (2005). “Logistics training: necessity or luxury?” *Forced Migration Review*.
- Ulloa, F. (2011). Manual de gestión de riesgos de desastre para comunicadores sociales. 1–69.
- Vargas Florez, J., Lauras, M., Okongwu, U. & Dupont, L. (2015). A decision support system for robust humanitarian facility location. *Eng Appl.*
- Verma, A., & Gaukler, G. M. (2015). Pre-positioning disaster response facilities at safe locations: An evaluation of deterministic and stochastic modeling approaches. *Comput. Oper. Res.*
- Viveros A., y Padilla L. (2015, 31 de Marzo). Las 31 peores catástrofes naturales de la historia. De La Urbe Periodismo. Recuperado de <http://delaurbe.udea.edu.co/>
- Zhan, S.-L., Liu, N., & Ye, Y. (2014). Coordinating efficiency and equity in disaster relief logistics via information updates. *Int. J. Syst. Sci.* 45, 1607–1621.
- Zhang, J., Li, J., & Liu, Z. (2012). Multiple-resource and multiple-depot emergency response problem considering secondary disasters. *Expert Syst. Appl.* 39, 11066–11071
- Zhen, L., Wang, K., & Liu, H.-C. (2015). Disaster Relief Facility Network Design in Metropolises. *IEEE Trans. Syst. MAN Cybern.* 45, 751–761.
- Zokaee, S., Bozorgi-Amiri, A., & Sadjadi, S. J. (2016). A robust optimization model for humanitarian relief chain design under uncertainty. *Appl. Math. Model.*