



Trabajo de grado en modalidad de aplicación

[191017] Modelo de localización de centros de acopio para la
gestión del riesgo hidrometeorológico asociado a movimientos
en masa en Antioquia

Alejandra Hernández Rodríguez ^{a,c} , Paula Cristina Rivera Daschmann ^{a,c} , María
Daniela Garzón Sanabria ^{a,c} , Manuela Ocampo Hernández ^{a,c}

John Leonardo Vargas Mesa ^{b,c}

^a Estudiante de Ingeniería Industrial

^b Profesor, Director del Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^c Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen de diseño en Ingeniería

Natural disasters around the world have increased in last decades, this has generated the need to create contingency plans by governments to reduce the associated risks. These plans include the facility location with the aim to attend emergencies. At the theoretical level, the associated problem is known as *Facility Location*, this has been studied with the use of methodologies like Linear Programming, Metaheuristics, and *Agent Based Modeling* (ABM) Simulations integrated with *Geographical Information Systems* (GIS). In Colombia, hydrometeorological disasters, especially mass movements, are the principal cause of most of the deaths due to natural disasters. For this reason, the lack of sectorial plans that mitigates the impact of this kind of disasters is associated with the increase of victims and affected families in Colombia. (DNP y Banco Mundial, 2012).

In this project was studied the case of Emergency *Facility Location* in Antioquia, Colombia. The main objective was to determine the potential locations for Facilities that will distribute humanitarian aid to the affected population by mass movements. For this reason, it was intended to maximize the served population while minimizing the number of assigned facilities.

Therefore, for the location of the Facilities, was performed the interaction of a metaheuristics and an *Agent Based Model Simulation* in the software Netlogo. The goal of the metaheuristics was to determine the potential locations for Facilities with the use of an Iterated Local Search (ILS) methodology. First, his methodology established an initial solution, that guaranteed a wide coverage of the affected population. Secondly, the metaheuristics carried out the Iteration process, in which was analyzed the towns that were attended by each Facilities, this with the aim of maximizing the coverage of the affected population. Then, the Perturbation process was carried out, this process depended of an exploration percentage and of a defined number of disturbances. The Perturbation process had the aim of reallocate the Facilities established in the initial solution, this in order to find another local maximums in the Objective Function. Finally, all the selected solutions by the metaheuristics were evaluated in the simulation model for a medium period of time.

The simulation model was based on the information provided by a *Geographical Information System* (topographic and mass movements maps, provided by Geological Colombian Service). The simulation model

recreated the creation of mass movements and evaluated the impact on towns according to the interaction of the agents in each of the scenarios.

Then, in order to find the best solution, 27 scenarios were established by the combination of the following parameters: number of Facilities (5, 10 and 15), Exploration Percentage (30%, 50% and 75%), number of Iterations (10, 25 and 50) and Disturbances (3, 5 and 10). Each of these scenarios was executed twice, and through a series of statistical analyzes and tests (ANOVA and LSD) it was possible to determine the best solution in terms of the parameters mentioned above, it is represented on Table 1 and the Figure 1 (the yellow towns are those that were assigned as a Facilities).

Number of facilities		
5		
Exploration Percentage	Perturbations	Iterations
30%	10	50
Assigned facilities		
Bello		
Apartadó		
Envigado		
Itagui		
Andes		

Table 1. Parameters of the Best Solution.

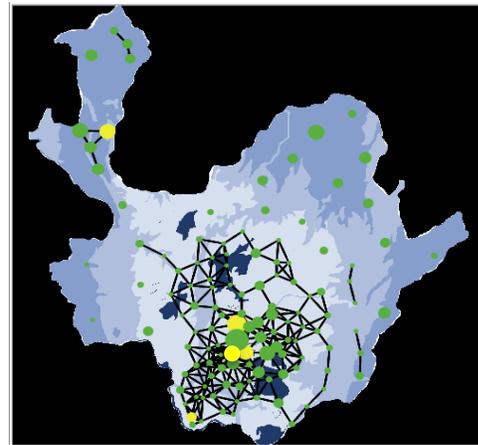


Figure 1. Assignment of Distribution Centers.

Once the best solution was determined, it was evaluated on the simulation environment for a period of 30 years. From the results obtained, a descriptive analysis of the data was carried out. It was observed that with the proposed locations for the Facilities the 70% of the affected population will be attended. The above results indicate that the solution found was good in terms of achieving the objectives proposed in the project, it was not intended to provide full coverage, the idea was to guarantee at least a high percentage of coverage with the least amount of Facilities. Consequently, the social and economic impact of the construction of the Facilities was evaluated. It was established that the cost of the project would be approximately 15% of the annual national budget for infrastructure that reduce the consequences of natural disasters in Colombia.

In conclusion, with this project it was possible to establish a methodology that allocates Facilities for humanitarian aid distribution in a region of Colombia prone to mass movements. This methodology can be used for future works that cover the problem of *facility location* or it can also be complemented from different types of engineering problems such as the implementation of an inventory model or a routing problem.

1. Justificación y planteamiento del problema

Los desastres naturales se definen como la ocurrencia inesperada de fenómenos naturales que ponen en peligro a un grupo de personas y su entorno; por consiguiente, cuando no se tiene una adecuada gestión del riesgo, los desastres terminan ocasionando un gran número de muertes y daños de bienes materiales. Acordado al tipo de desastre y su magnitud, las consecuencias pueden llegar a ser catastróficas a nivel social y económico. Según cifras del Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2018), la frecuencia de los desastres a nivel mundial se ha triplicado desde la década de los ochenta y los países con menores ingresos se han visto más afectados respecto a los países desarrollados, lo que ha causado un incremento en la tasa de muertes por desastres naturales. Por lo anterior, países en el Caribe y Latinoamérica han venido realizando esfuerzos para mitigar el impacto que tienen estos fenómenos en la sociedad (Banco Mundial, 2012).

Teniendo en cuenta lo anterior, Colombia ha tenido que enfrentarse a grandes crisis humanitarias debido a la ocurrencia de desastres naturales y a la insuficiente gestión de riesgos (Banco Mundial, 2012). Entre las principales catástrofes ocurridas en Colombia, se encuentran la avalancha de Armero en 1985, el Terremoto de Armenia en 1999 y el deslizamiento en Villatina en 1987 (Villada, 2015). Respecto a los esfuerzos realizados por los gobiernos a través de los años para mitigar el riesgo y el impacto de este tipo de eventos naturales, se puede concluir que estos no han sido suficientes para cumplir dicho objetivo. Un ejemplo claro de esta problemática es la avalancha ocurrida en Mocoa en 2017, la cual dejó, según cifras del Instituto de Medicina Legal (2017), 333 muertos, 398 heridos y 71 personas desaparecidas.

En el 2017 la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres de la Presidencia de la República de Colombia (UNGRD) recopiló información acerca de los desastres históricos en el país relacionados con inundaciones, movimientos en masa, flujos torrenciales y geológicos, sequías e incendios, desde 1998 hasta el 2016. Según el DNP, basado en los datos anteriores, el 88% del total de desastres ocurridos en este periodo de tiempo fueron de origen hidrometeorológico, ocasionando la destrucción de aproximadamente 2.800 viviendas al año y la muerte de 160 personas en promedio en las últimas dos décadas (DNP, 2018). Los riesgos hidrometeorológicos son aquellos ocasionados por el agua y las condiciones meteorológicas extremas como ciclones tropicales, sequías, inundaciones, entre otros. (Secretaría de Protección Civil del Gobierno del Estado de Campeche en México, 2018).

Por otra parte, el DNP también evaluó el índice municipal de riesgo de desastres de Colombia tomando la amenaza como componente de riesgo principal y siendo definida por la cantidad de muertes, número de hectáreas afectadas y la susceptibilidad de cada uno de los tipos de riesgos hidrometeorológicos (inundaciones lentas, movimientos en masa y flujos torrenciales). En la evaluación del índice nombrado anteriormente, según el DNP (2018), los movimientos en masa se encuentran en primer lugar con un 66% de muertes, siendo este el segundo riesgo con la mayor cantidad de viviendas afectadas y con una probabilidad de ocurrencia del 15% como se muestra en la Figura 2.

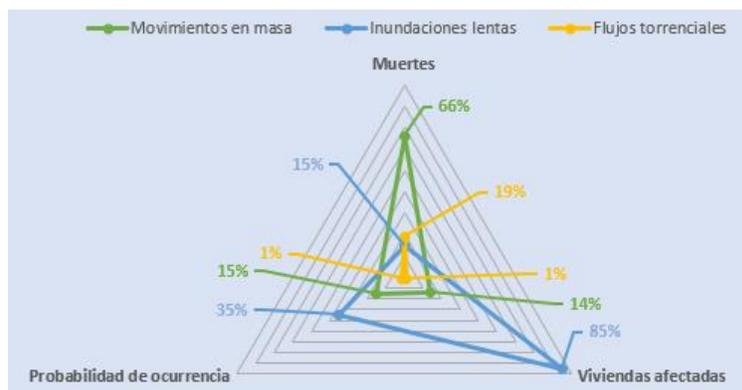


Figura 2. Nivel de muertes, probabilidad de ocurrencia y viviendas afectadas de los 3 principales riesgos hidrometeorológicos.

Con base en lo anterior, los riesgos asociados a los desastres hidrometeorológicos en Colombia pueden ser catalogados como de alta importancia. Por esta razón, la gestión de riesgos de desastres para estos eventos es sumamente importante. El Banco Mundial afirma que “los desastres pueden eclipsar años de inversión para el desarrollo de los países, pero a su vez, las causas del riesgo pueden estar arraigadas en errores y problemas de los mismos procesos de desarrollo” (2012). Adicionalmente, de acuerdo con las cifras del DNP, la inversión a nivel nacional para antes del 2009 no superó los 1000 millones de pesos anuales, situación que mejoró entre el 2010 y el 2012 con una inversión 3 veces mayor a la del periodo 2002 - 2009 (DNP, 2018). En este contexto, y considerando las situaciones vividas en Colombia a causa de los movimientos en masa, el Gobierno del expresidente Juan Manuel Santos tomó la decisión de revisar integralmente las políticas de gestión del riesgo con apoyo del DNP y el Banco Mundial (DNP y Banco Mundial, 2012). En el análisis se identificaron una serie de factores por los cuales el riesgo está aumentando, siendo uno de ellos la falta de planes sectoriales que mitiguen el impacto de las futuras catástrofes.

La Coordinación Nacional para la Reducción de Riesgos (CONRED) de Guatemala desarrolló un Manual de Gestión para la Reducción del Riesgo a los Desastres. Este manual cuenta con 12 pasos que tienen como objetivo mitigar el impacto de una catástrofe natural presentando un plan de acción antes, durante y después del evento. En concreto, el paso número seis se enfoca en los planes de respuesta y atención a emergencias para

buscar acciones de respuesta rápida, fortalecer capacidades en la población, priorizar emergencias, establecer un sistema de administración, tomar decisiones eficaces y definir la ubicación de infraestructuras físicas que cumplan con las medidas mínimas de protección para atender emergencias (centros de acopio, albergues, centros de salud, etc.) (CONRED, 2015).

En vista de la afectación producida por la falta de planes sectoriales y la gestión de los planes propuestos por la CONRED, es importante realizar planes de contingencia en caso de desastre. Un buen inicio sería abarcando la entrega de ayudas humanitarias a la población afectada con el objetivo de garantizar el derecho fundamental de la salud. De acuerdo con la Constitución de la Organización Mundial de la Salud (2014), la salud es una condición fundamental para lograr la paz y la seguridad. La importancia de este derecho ha otorgado a los gobiernos la responsabilidad de velar por la salud de sus pueblos en situaciones de desastres en donde esta condición adquiere una mayor importancia, en especial durante las primeras fases de la emergencia, ya que será determinante para garantizar la supervivencia de los afectados (Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo, 2013).

Teniendo en cuenta lo anterior, la localización previa de centros de acopio para la entrega oportuna de ayudas humanitarias permitirá que la gestión posterior al evento catastrófico sea eficiente, disminuyendo así el posible impacto socio-económico que tendrá el departamento escogido como caso de estudio. Este impacto será medido por la cobertura de personas afectadas por el desastre y el costo social global (Cotes y Cantillo, 2018). Este costo, en concreto, es la suma de los costos privados (costos relacionados con el de número instalaciones a construir) y de los costos de privación, definidos como la pérdida del bienestar de las personas al no tener acceso a ítems que sustentan la vida. Así mismo, es importante resaltar que el proyecto busca desarrollar una metodología escalable a otros departamentos o regiones del país susceptibles a los movimientos en masa y, en vista de la necesidad de proyectos para la gestión del riesgo relacionados con la entrega de ayudas humanitarias determinar la ubicación de centros de acopio en un departamento de Colombia, los cuales maximizarán la cobertura de la población afectada por movimientos en masa. Finalmente, se plantea la siguiente pregunta de investigación: *¿Cómo determinar las ubicaciones de centros de acopio para la entrega de ayudas humanitarias en un departamento de Colombia de manera que el impacto socioeconómico producido por posibles movimientos en masa sea reducido?*

2. Antecedentes

El problema de localización de centros de acopio en el contexto de la gestión de riesgos por desastres naturales ha sido asociado a nivel teórico con *facility location problem*. De acuerdo con Caunhye, Nie y Pokhare (2011), la primera investigación en desastres naturales se dio en 1970 con una catástrofe marítima. Este problema ha tenido diferentes formas de solución con modelos lineales, metaheurísticas y, más recientemente, simulaciones bajo el paradigma *agent based modeling* (ABM). Debido a lo anterior, en las siguientes secciones se mostrará la literatura estudiada agrupada en cinco temáticas: simulación-optimización, metaheurística y simulación.

2.1. Simulación-Optimización

Los problemas de ingeniería en los cuales se abordan temáticas de Logística, Producción, entre otros, usualmente utilizan técnicas de simulación para evaluar la calidad de las soluciones obtenidas (Talbi, E., 2009). Por ejemplo, en el artículo (Mota, M., 2017) emplea la combinación de la simulación y optimización, en diferentes escenarios, con el fin de minimizar el costo de la distribución de materiales peligrosos.

De esta manera surge el término Simulación-Optimización (SO), el cual utiliza un conjunto de técnicas con el fin de optimizar sobre simulaciones estocásticas. De acuerdo con (Amaran, S., 2016), dicha optimización se emplea con el fin de encontrar los valores de los parámetros que permitan alcanzar la mejor solución conjunta. La evaluación de la solución conjunta se realiza en *black box*, como se observa en la Figura 3.

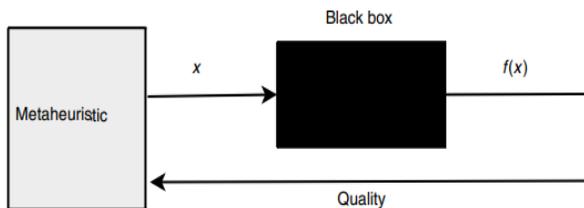


FIGURE 1.14 Black box scenario for the objective function.

Figura 3. Procedimiento Simulación-Optimización. Tomado de: Talbi, E., 2009.

2.2. Metaheurística

A continuación, se mostrarán secciones donde se expondrán diferentes temas con la intención de contextualizar al lector. En primera instancia se exponen conceptos básicos como, por ejemplo, logística humanitaria (LH), *facility location* (FL), optimización (OP), SIG y ABM. En segunda instancia, se muestra el enfoque del problema de *facility location* junto con el conjunto de métodos de LH, OP, ABM y SIG. Finalmente, se evidencia la combinación de FL con ABM y SIG en desastres naturales.

2.2.1. Conceptos básicos

Las organizaciones humanitarias tienen como objetivo principal maximizar la demanda cubierta, la respuesta al desastre y prevenir futuros daños a la población afectada. De acuerdo con lo anterior, según Caunhye et al., (2011), la mayoría de los investigadores adoptaron modelos de simulación y optimización con el fin de solucionar problemas asociados a logística humanitaria; dichos problemas se dividen esencialmente en tres categorías: la primera, diseño de red y ruteo de vehículos; la segunda, localización de instalaciones; la tercera, operaciones integradas. Las incertidumbres en la demanda, suministros y disponibilidad de recursos hacen necesario que se empleen herramientas que provean respuestas rápidas y factibles; por tanto, los modelos mencionados anteriormente proporcionan solución al problema de forma integral.

Por otro lado, en la investigación realizada por Sebatli, Cavdur y Kose-Kucuk (2017) se estudió el problema de localización de centros de acopio y distribución de ayudas a través de un modelo de simulación y programación lineal. De esta manera, se minimizó el número de localizaciones y el costo de distancia, así como el de distribución. El caso de estudio pretendió analizar el tiempo que le toma a las organizaciones humanitarias atender el área afectada; por consiguiente, emplearon un terremoto simulado por *Prime Ministry Disaster and Emergency Management Authority* (AFAD) para realizar las respectivas mediciones. El estudio concluyó que, mediante el uso de modelos de simulación y programación, es posible determinar las ubicaciones de los centros de distribución de ayudas, así como que es posible generalizar estos modelos para otros tipos de desastres.

De igual forma, los modelos de optimización son una herramienta esencial para dar seguimiento a los problemas de logística humanitaria. Los desastres generan demandas masivas de bienes, lo que origina superar el límite de los recursos disponibles; así que, según Balcik y Beamon (2008) se presentan algunos desafíos que impiden la respuesta adecuada a la logística humanitaria como incertidumbre, complejidad en comunicación y coordinación, tiempo de entrega y recursos limitados. Con el objeto de dar solución a dichos desafíos se indagó que, mediante el uso de modelos probabilísticos, simulación (teoría de colas y teoría de decisiones) y optimización, es posible mejorar el manejo de operaciones logísticas humanitarias. De acuerdo con el estudio hecho por Caunhye et al., (2011), este concluyó que no se deberían emplear modelos multiobjetivo dado que son difíciles de solucionar; sin embargo, independiente de la metodología a utilizar, estos modelos deberían encaminarse a minimizar los tiempos de respuesta, costos de distancia y maximizar la demanda cubierta.

Tal como se mencionó anteriormente, se emplearon diferentes métodos de optimización para solucionar el problema de *facility location*. Ahora dicho desde otra perspectiva, se mostrará cómo abordar el problema con SIG. Esta es una herramienta que permite entender y describir las relaciones espaciales de las organizaciones y según Longley, Goodchild, Maguire y Rhind (2011) el sistema provee no solamente la manipulación de datos espaciales, sino que también permite modelar problemas y encontrar una solución teniendo en cuenta el contexto geoespacial. El estudio permitió observar cómo debería ser organizada la prestación de asistencia médica con la finalidad de mejorar el acceso y cuidado, teniendo en cuenta principalmente el bienestar de la población. Los resultados observados permitieron concluir que el uso de SIG es indispensable para la adecuada prestación de servicios.

Bae, Lee, Kim, Lee, Lee, Cha, Kim, y Kim (2015) utilizaron ABM junto a SIG para planear el servicio médico desde el rescate de la persona en un desastre hasta el fin del servicio. Con esta simulación se logró un mapeo de la situación, el cual junto con una regresión lineal demostró la correlación entre el tiempo de rescate y número de asistentes, obteniendo así un sistema que evaluó el proceso de un servicio médico de una persona en un desastre. Por último, en la Figura 4 se muestra el resumen literario para esta sección. Si se desea consultar mayor detalle de los 7 artículos científicos consultados dirigirse al Anexo 1.

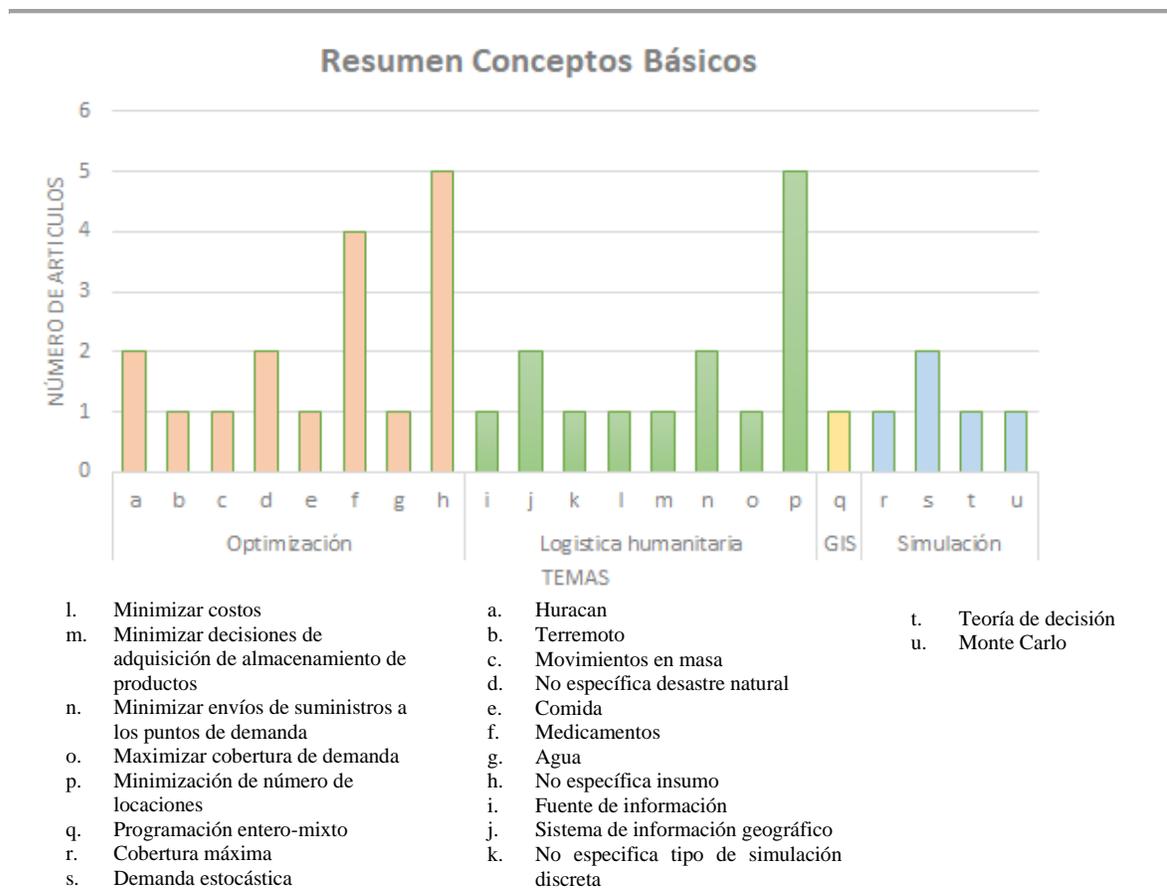


Figura 4. Resumen Revisión Literaria para Conceptos Básicos.

2.2.2. Facility location

La investigación realizada por Boonmee, Arimura y Asada (2017) analizó cuatro problemas de *facility location* (ubicaciones determinísticas, dinámicas, estocásticas e instalaciones sólidas). Teniendo en cuenta los problemas anteriores se evaluó y documentó el modelado de datos, el tipo de desastre, las decisiones, los objetivos, las restricciones y los métodos de solución, con el fin de presentar las aplicaciones en el mundo real e identificar las brechas de la investigación de cada uno de ellos.

Por otra parte, por Doungpan, U-tapao, Moryadee y Laokhongthavorn (2018) propusieron tres heurísticas (*set covering location problem*, *p-median* y *p-center*) integradas con SIG para generar soluciones al problema de *facility location*. El primer tipo de metaheurística tuvo como intención maximizar la cobertura, a través de la ubicación de centros de acopio cumpliendo con la cobertura total de la demanda y el número mínimo de instalaciones a ubicar. El segundo método consideró identificar ubicaciones medias satisfaciendo el cumplimiento de servicios y demanda. Por último, el tercer procedimiento tenía como objetivo minimizar la distancia entre las zonas afectadas y la ubicación del centro de acopio. Los resultados inicialmente obtenidos

mostraron que fue necesario localizar cuatro instalaciones; sin embargo, al realizar un análisis de sensibilidad se determinó que el número de localizaciones puede oscilar entre dos y cuatro aun así las soluciones siguen siendo factibles y cercanas al óptimo.

El estudio realizado por Xie (2018) muestra una aproximación para la solución al problema de *facility location* de centros comerciales, por medio de dos heurísticas (gravedad múltiple y gravedad) y haciendo uso de SIG con el propósito de minimizar la distancia recorrida. De esta forma, mediante la combinación de SIG y heurísticas de gravedad múltiple se obtuvo un sistema logístico eficiente. Para terminar, en la Figura 5 se muestra el resumen literario para esta sección. Si se desea conocer más información de los 7 artículos científicos consultados dirigirse al Anexo 2.

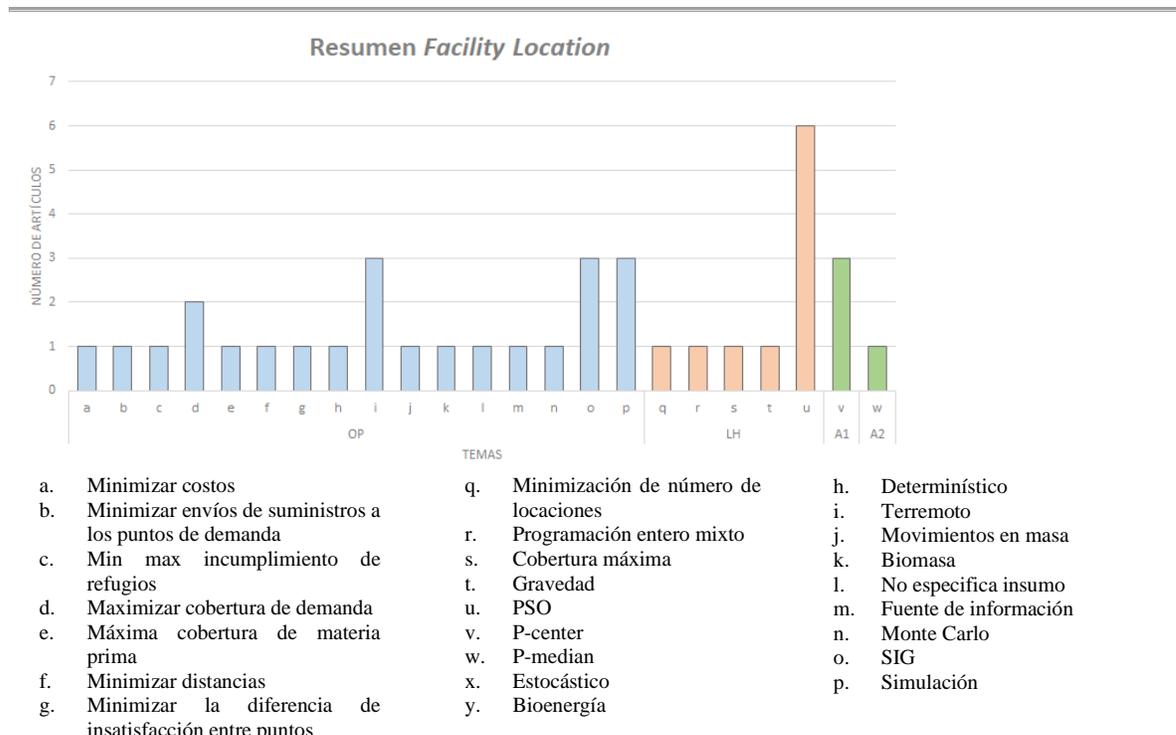


Figura 5. Resumen Revisión Literaria para Facility Location.

2.2.3. Facility Location con ABM implementando SIG en desastres

Khair y Maya (2017) planteó un modelo de ABM utilizando SIG, para la solución de *Facility Location* en un desastre natural; considerando cuatro escenarios simulados que se contrastaron con el desastre ocurrido en Merapi en año 2010. El diseño del modelo constó de tres etapas, las cuales fueron: visión general, diseño del concepto y detalle. En la primera parte se establecieron las entidades, las variables, los tiempos, el propósito y el programa de planeación. En la segunda etapa, se tuvieron en cuenta factores como: capacidad de los voluntarios, demanda y necesidades de las personas afectadas. Por último, se presentó la implementación en NetLogo 5.2.0. Por otra parte, la relación de las variables se determinó mediante un t-paired sample y la distribución de los datos con una prueba estadística denominada Shapiro-Wilk. Finalmente, se concluyó que el uso de la simulación basada en agentes es una herramienta eficiente para mejorar la capacidad de respuesta en un desastre.

2.2.4. Búsqueda Local Iterada

La Búsqueda Local Iterada (ILS), de acuerdo con (Talbi, E., 2009), es una metaheurística que mejora las soluciones brindadas inicialmente por una búsqueda local clásica, a través de una perturbación en las respuestas. En la Figura 6 se muestra el pseudocódigo de una ILS:

Algorithm 1 The general framework of the iterated local search algorithm

```
Current_Solution := Initialization();
Best_Solution := Current_Solution;
Iter = 0;
while (Iter <= Max_iter) do
  Current_Solution := local_search(Current_Solution);
  if (Cost(Current_Solution) < Cost(Best_Solution)) then
    Best_Solution := Current_Solution;
    Iter = 0;
  end
  else
    Iter = Iter + 1;
  end
  Current_Solution := Perturbation(Current_Solution)
end
```

Figura 6. Pseudocódigo Búsqueda Local Iterada. Salari, M. (2014).

El procedimiento que se realiza cuando se ejecuta ILS tiene cuatro etapas: Solución Inicial, Perturbación, Búsqueda Local y Aceptación. La primera, representa el punto de partida de la búsqueda. La segunda, se encarga de transformar parcialmente dicha solución inicial, con el fin de encontrar otros óptimos locales. La tercera, representa la metaheurística escogida para realizar la búsqueda local, asimismo la calidad de la metaheurística afectará directamente a los resultados del ILS y el tiempo de ejecución. La cuarta, verifica que la nueva solución encontrada sea mejor o de igual calidad.

ILS tiene diversas aplicaciones en logística: Salari, M. (2014) desarrolló un modelo de programación lineal e ILS para la solucionar la ubicación de centros de acopio en una emergencia maximizando la cobertura, teniendo en cuenta el presupuesto, costos de operación y capacidad de los centros de acopio. Por otra parte, Zarandi, M. H. F., Davari, S., & Sisakht, S. A. H. (2015) realizaron una comparación, en tiempos de ejecución y calidad de resultados, entre ILS y Simulated Annealing (SA) para dar solución a la ubicación de centros de acopio minimizando costos. En los resultados de la comparación, se evidenció que no había mayor diferencia de estos dos modelos.

2.3. Simulación

Teniendo en cuenta lo que se expuso previamente en las secciones de antecedentes, se lograron identificar los tipos de problemas y demandas, modelos de optimización y simulación, posibles dificultades que se pueden presentar, funciones objetivo, restricciones asociadas a la localización de instalaciones y análisis de resultados. Acorde a ello, para la solución del problema de *facility location* en desastres naturales, se definió que se utilizarán herramientas como: la metaheurística de *set covering location problem* con el objetivo de maximizar la demanda cubierta, usando una demanda estocástica de ayudas humanitarias; metodología para el diseño de un modelo de simulación basado en agentes empleando SIG, ILS y el uso optimización-simulación como se ilustra en la Figura 7.

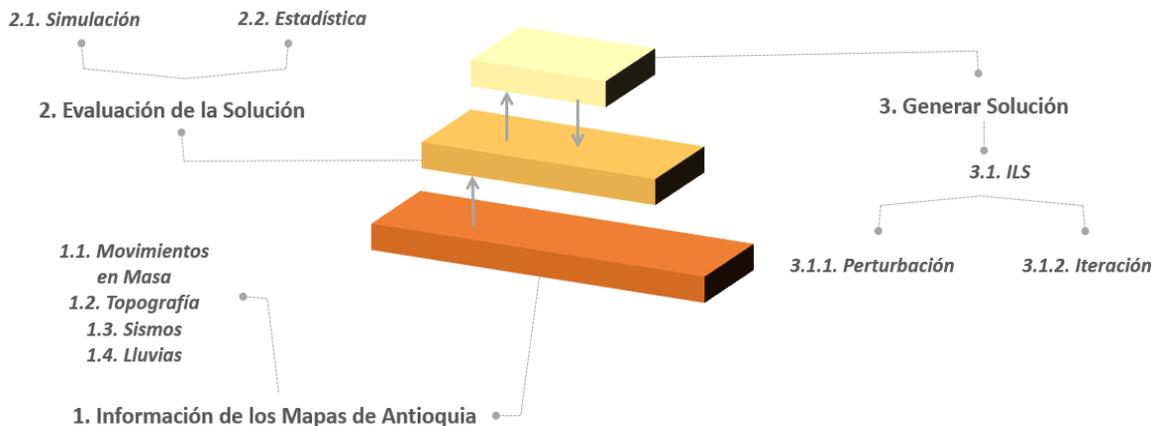


Figura 7. Panorama General de la Simulación-Optimización Planteada.

3. Objetivos

Objetivo general

Determinar ubicaciones potenciales para la construcción de centros de acopio, para mitigar el impacto socio-económico en la población afectada de un departamento de Colombia vulnerable a movimientos en masa.

Objetivos específicos

- *Desarrollar un modelo basado en agentes utilizando el software Netlogo, teniendo como base la información de la clasificación del riesgo de movimientos del Sistema Geológico Colombiano, para simular la ocurrencia y la afectación generada por este tipo de amenazas en el departamento de Antioquia.*
- *Construir una meta-heurística que determine la ubicación de los centros de acopio, para maximizar la cobertura de la población teniendo en cuenta las restricciones del problema.*
- *Analizar los resultados generados por la interacción entre la metaheurística y la simulación basada en agentes para estudiar el desempeño a largo plazo de las ubicaciones de los centros de acopio.*

4. Metodología

La metodología utilizada para determinar la ubicación de los centros de acopio se basó en la interacción entre una metaheurística que realizaba una *Búsqueda Local Iterada* y una simulación de un *Modelo Basado en Agentes*. El primer paso consistía en ejecutar la metaheurística, la cual tenía como objetivo determinar las ubicaciones potenciales de los Centros de Acopio a medida que maximizaba la cobertura de la población afectada. Primero, la metaheurística establecía una asignación inicial de centros de acopio a través de un indicador de riesgo, esto garantizaba una amplia cobertura de la población afectada por movimientos en masa. Seguido a esto, se realizaba el proceso de Iteración en donde se analizaban y cambiaban los centros poblados que iban a ser atendidos por cada uno de los centros de acopio, esto con el objetivo de maximizar la cobertura brindada por los centros de acopio. Luego, se procedía con el proceso de Perturbación, el cual dependía de un porcentaje de exploración (número de centros de acopio que iban a ser reasignados) y un número de perturbaciones definidas, con esto se cambiaba la asignación de algunos de los centros de acopio establecidos en la solución inicial con el objetivo de encontrar otros máximos locales en la función objetivo (mayor cobertura de la población afectada). Posteriormente, cada una de las soluciones arrojadas por la metaheurística eran evaluadas en el modelo de simulación. El modelo de simulación se fundamentó en la información suministrada por un *Sistema de Información Geográfica*, el cual permitió recrear las dinámicas de los movimientos en masa, determinar la afectación de estos a la población y finalmente, evaluar la cobertura brindada por los centros de acopio a mediano plazo.

4.1. Metodología de la Simulación

La Simulación se compone de tres grandes divisiones: poblados, avalanchas y expansión. Inicia cuando cada uno de los poblados (municipios) genera un número aleatorio entre 0 y 1, si este número aleatorio es menor a la probabilidad de ocurrencia, la cual fue construida con valores de los últimos 31 años de la base de datos DesInventar.org (Sistema de Inventario de efectos de Desastres), información puesta a disposición para el público por la Corporación OSSO¹, se crea una avalancha en uno de los patches asignados a dicho poblado. Las características de la avalancha como: Tipo (alta, media o baja), Magnitud y Porcentaje de Afectación (muy bajo, bajo, medio y alto) se definen según la topografía del lugar donde se generó, los valores de las características y

¹ Organización dedicada a “promover, apoyar y ejecutar investigaciones científicas, difusión y extensión de conocimientos, apropiación y desarrollo de metodologías y de tecnologías, así como actividades afines, en los campos de la dinámica de la Tierra Sólida, de la Hidrósfera y de la Atmósfera, y de sus interacciones con la Sociedad” (Corporación OSSO, s.f.).

la forma en cómo se construyeron se encuentran detallados en el Anexo 3. Entre más alta sea la avalancha, mayor magnitud y afectación tendrá.

Por otra parte, es importante resaltar que la topografía del terreno es extraída del mapa topográfico de Antioquia, el cual fue tomado del Sistema Geológico Colombiano, cada avalancha habilita una serie de patches que son el terreno por donde se podrá expandir. El terreno tiene forma cónica y se define por la magnitud de la avalancha y un ángulo de 60° (ver Figura 8), la geometría de expansión definida se encuentra sustentada en el Anexo 3. Posteriormente, después de tener habilitado el terreno, se procede a realizar la expansión. Cuando se realiza la expansión, se miran los vecinos (ver Figura 9) de cada uno de los patches que han sido afectados, de esta manera si la topografía del vecino es menor a la del patch evaluado y se encuentra habilitado para la expansión inmediatamente se afecta.

Finalmente, cuando se completa la expansión se calcula la cantidad de patches afectados y cuál es su distancia respecto al origen de la avalancha, (ver figura 10). Es importante recordar que la cantidad de habitantes de cada poblado son divididos por igual en cada uno de los patches asignados a dicho poblado, por ejemplo, Bello tiene aproximadamente 533.000 habitantes y 100 patches son asignados a Bello, por lo tanto, la densidad poblacional de cada patch será de 53.300. El diagrama de flujo de la simulación se encuentra en el Anexo 4.

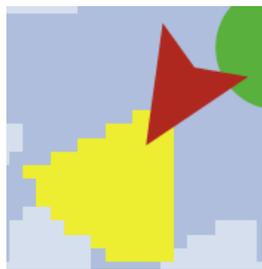


Figura 8. Terreno cónico habilitado para la Expansión de la Avalancha.

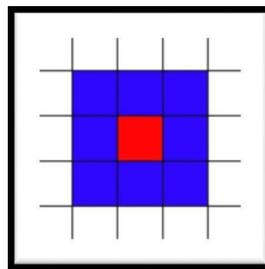


Figura 9. Vecindario (color azul) del Patch de color rojo.

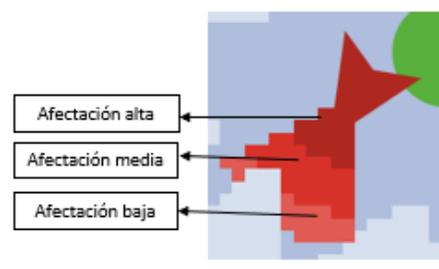


Figura 10. Avalancha expandida junto con los 3 Niveles de Afectación poblacional

4.2 Modelo Matemático

El modelo matemático propuesto tiene Poblados $J: \{J1, J2, J3...J\}$. Las variables de decisión del modelo son: si el Poblado $j \in J$ es Centro de Acopio (X_j), la cantidad de personas que podrían ser atendidas por el Centro de Acopio $j \in J$ del Poblado $i \in J$ (Y_{ji}) y si el Poblado $i \in J$ es atendido por el Centro de Acopio $j \in J$ (W_{ij}). Así mismo, éste considera la capacidad de Personas que puede atender el Centro de Acopio $j \in J$ (Q_i), población del Poblado $j \in J$ (P_j), la cantidad de centros de acopio a crear (C) y un parámetro binario que define si el Centro de Acopio $j \in J$ puede cubrir el Poblado $i \in J$ (H_{ij}). El propósito del modelo es maximizar la atención de la población afectadas y minimizar la cantidad de Centros de Acopio, la formulación del Función Objetivo se se puede observar en Ecuación 1.

$$Max Z: \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \frac{Y_{ij}}{C}$$

Ecuación 1. Función Objetivo del Modelo.

Para el planteamiento de la función objetivo se tuvo en cuenta la población afectada por los movimientos en masa atendida por los centros de acopio y la cantidad de estos. Teniendo en cuenta que es un modelo estocástico la aleatoriedad se consideró en el diseño de la simulación al momento de generar las avalanchas, esta generación está limitada por la probabilidad de ocurrencia mencionada en la Metodología de la Simulación. El cálculo de la función objetivo se planteó como se muestra en la Ecuación 1, buscando darle realismo al modelo, dado que, si no se hubiera incluido la limitante de la cantidad de centros de acopio, la metaheurística tendería a crear centros de acopio en los 125 municipios para maximizar la población atendida.

Por otra parte, dentro de las restricciones del modelo sugerido precisa que el Centro de Acopio $i \in I$ sólo se ubique en una Población (ver Ecuación 2), se debe asignar al menos un poblado a cada centro de acopio (ver Ecuación 3), el poblado en donde se encuentre es centro debe ser asignado al mismo (ver Ecuación 4), por

último, la población atendida por el centro i debe ser menor o igual a su capacidad (ver Ecuación 5). A continuación, se muestra la formulación de las restricciones se muestran a continuación.

$$\sum_{j \in J} X_j = C$$

Ecuación 2. Restricción 1 del Modelo.

$$\forall j \in J \sum_{i \in J} W_{ij} * H_{ij} \geq 1$$

Ecuación 3. Restricción 2 del Modelo.

$$\forall i \in J, \forall j \in J X_j - (W_{ij} * H_{ij}) \leq 0$$

Ecuación 4. Restricción 3 del Modelo.

$$\forall i \in J \sum_{j \in J} Y_{ij} * H_{ij} \leq Q_i$$

Ecuación 5. Restricción 4 del Modelo.

4.3 Metodología de la Metaheurística

El primer paso para ejecutar el modelo es cargar los mapas del departamento de Antioquia. Los mapas que se emplearon con el fin de ambientar adecuadamente el modelo fue el topográficos y riesgo de movimientos en masa, adicionalmente se define la capacidad que tendrá cada uno de los Centros de acopio, el cálculo de dicha asignación se podrá encontrar en el Anexo 3. El segundo paso, después de haber configurado los parámetros iniciales, es generar una Solución Inicial. Dicha Solución Inicial tal como se muestra en la Figura 11, señala los lugares donde se deberían instalar los Centros de Acopio. Las ubicaciones anteriores, considerando la programación del modelo, garantizan la máxima cobertura de la población vulnerable, el diagrama de flujo de la Solución Inicial se presenta en el Anexo 5.

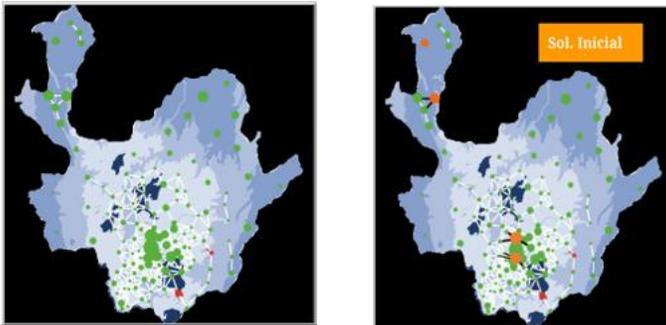


Figura 11. Solución Inicial de la Metaheurística.

En el tercer paso se realiza el procedimiento de ILS, el cual está dividido en dos etapas en la metaheurística. La primera de ellas, Iteración, analiza las conexiones de los Poblados que se asignaron en la Solución Inicial como Centros de Acopio con el fin de encontrar la máxima cobertura de Población Afectada cambiando las conexiones presentadas anteriormente.

El procedimiento de la iteración se presenta en la Figura 12 Primero se crea una solución inicial de centros acopio con sus links, los cuales están ilustrados con una línea negra. Luego se explora otras posibilidades de links ignorando los enlaces asignados en la solución inicial, lo cual se puede observar como la línea roja. Después se pregunta si esa nueva solución es mejor que la inicial, si es mejor se asigna la nueva solución como mejor solución y se ignora la solución inicial; de lo contrario se deja la mejor solución como la mejor solución.

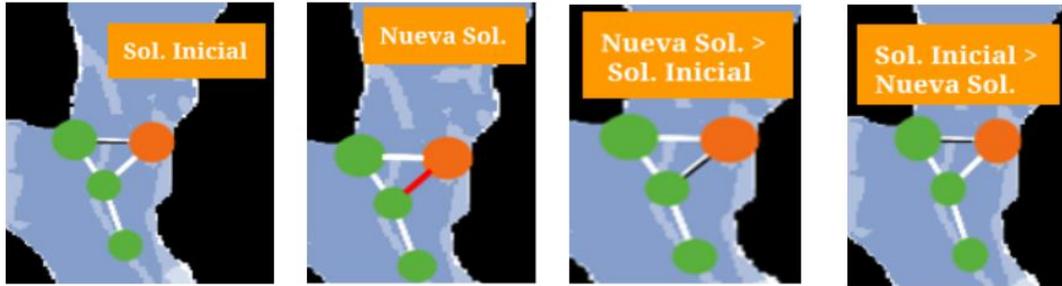


Figura 12. Iteración de la Metaheurística.

La segunda etapa de ILS es la Perturbación, la cual se encarga de cambiar la asignación de los Centros de Acopio definidos en la Solución Inicial con el fin de maximizar la cobertura de la Población Afectada. El diagrama de flujo de ILS se encuentra en el Anexo 6.

El procedimiento de las Perturbaciones se ilustra en la Figura 13. Para empezar, se identifica la solución inicial y después se calcula la nueva solución. La nueva solución se halla por medio de la eliminación del Número de Centros de Acopio asignados en la solución inicial de acuerdo con el Porcentaje de Exploración. Dicha eliminación se redondea hacia arriba (centros morados) y se buscan la misma cantidad de nuevos centros que no estén en la solución inicial (centros amarillos). Por ejemplo, si en la solución inicial se asignaron 4 centros y se tiene un porcentaje de exploración del 75%, cuando se proceda a calcular la nueva solución se cambiarán 3 de 4 asignaciones anteriores. Posteriormente a estos nuevos centros se les asigna los links. Finalmente se pregunta si la nueva solución es mejor que la solución inicial, si es así se deja la nueva solución, pero de lo contrario se deja la solución inicial.

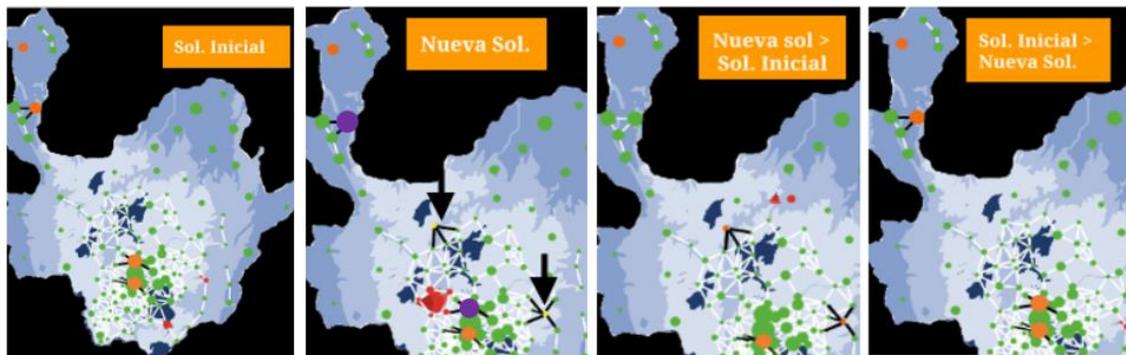


Figura 13. Perturbación de la Metaheurística.

5. Resultado

5.1. Modelo de Simulación

Con el objetivo de verificar si el modelo de simulación representaba de forma adecuada el comportamiento histórico de los movimientos en masa sucedidos en el departamento de Antioquia durante los últimos 31 años y que los supuestos utilizados para la construcción del modelo fueron acertados, se realizó un proceso de validación. Para el proceso de validación se compararon diferentes medidas de desempeño del modelo teniendo en cuenta el comportamiento de los datos reales. Para lo anterior, se construyeron intervalos con un 95% de confianza con base en las respectivas medias y desviaciones muestrales de los datos históricos, para cada una de las medidas de desempeño.

Las medidas de desempeño a tener en cuenta en el proceso de validación fueron las siguientes:

- Cantidad de avalanchas anuales en Antioquia.
- Cantidad de avalanchas anuales por municipio.
- Cantidad de personas afectadas anualmente por avalanchas en Antioquia.

Para verificar el grado en que los resultados de la simulación se adecuaban a los datos reales, se corrió la simulación 100 veces para periodos de un año y posteriormente, se calculó un promedio para cada una de las 127 medidas de desempeño, las cuales fueron comparadas con los intervalos de confianza de los datos.

Con el fin de visualizar el comportamiento que tuvieron las medidas de desempeño a y c descritas en la sección anterior, se realizaron las gráficas presentadas en las Figuras 14 y 15, en donde se muestran los resultados obtenidos en las 100 ejecuciones de la simulación, la cantidad de avalanchas promedio es de 34 y la cantidad de personas afectadas en promedio es de 1314.

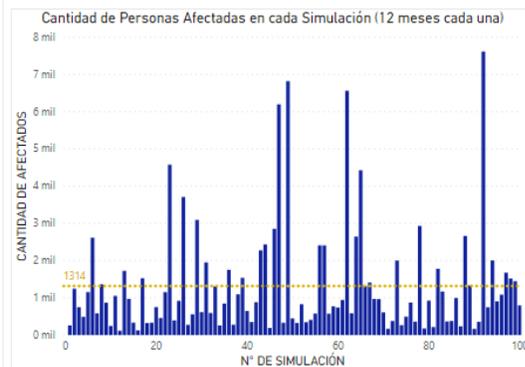
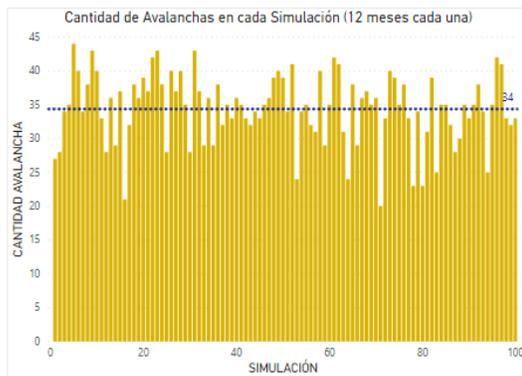


Figura 14. Cantidad de Avalanchas en cada simulación.

Figura 15. Cantidad de Personas Afectadas en cada simulación.

Del proceso de validación se obtuvo como resultado que el 99,21% de las medidas de desempeño se encontraban dentro de los intervalos de confianza establecidos (ver Anexo 7). Sin embargo, con el fin de demostrar estadísticamente que el comportamiento de la simulación refleja el comportamiento real de los movimientos en masa, se realizó una prueba de hipótesis de diferencia de medias entre los datos obtenidos por medio de la simulación y los datos reales. La prueba de hipótesis se planteó de la siguiente manera, con un nivel de significancia del 5%:

$$H_0: H_{\text{simulación}} = H_{\text{datos reales}}$$

$$H_1: H_{\text{simulación}} \neq H_{\text{datos reales}}$$

Ecuación 6. Pruebas de hipótesis para la validación modelo de simulación

Como principal resultado se obtuvo que el 99,21% de las pruebas de hipótesis realizadas a cada una de las medidas de desempeño fueron aceptadas (ver Anexo 7). Lo anterior significa que el modelo de simulación representa de forma adecuada el comportamiento histórico de los movimientos en masa sucedidos en Antioquia durante los últimos 31 años.

5.2 Metaheurística

En las siguientes secciones se mostrarán los resultados obtenidos por la metaheurística. Para empezar, se describen los escenarios. Luego se muestran y analizan los resultados obtenidos de la metaheurística a través de gráficos y pruebas estadísticas como ANOVA y LSD. Así mismo, se evalúa la eficiencia de los diferentes escenarios. Finalmente, se determina la mejor solución y se analiza a largo plazo por medio de pruebas estadísticas.

5.2.1. Descripción de Escenarios

En el presente trabajo, con el fin de llevar a cabo un adecuado proceso de Simulación-Optimización, se determinaron los siguientes parámetros para encontrar los valores que maximizan la función objetivo: Porcentaje de Exploración, Número de Centros de Acopio, Perturbaciones e Iteraciones. La combinación de estos parámetros tiene como objetivo determinar el escenario en el que obtenga la mejor interacción entre la función objetivo y población atendida. Las combinaciones realizadas se muestran en la Tabla 2 y en la Tabla 3 se muestra el Promedio y Varianza de los resultados para cada uno de los escenarios.

	Número de Centros de Acopio (N)								
	5			10			15		
	Porcentaje de Exploración (%)								
<i>Perturbaciones (P) e Iteraciones (I)</i>	0,3	0,5	0,75	0,3	0,5	0,75	0,3	0,5	0,75
<i>P3-I10</i>	N5-%0,3	N5-%0,5	N5-%0,75	N5-%0,3	N5-%0,5	N5-%0,75	N5-%0,3	N5-%0,5	N5-%0,75
<i>P5-I25</i>	N5-%0,3	N5-%0,5	N5-%0,75	N5-%0,3	N5-%0,5	N5-%0,75	N5-%0,3	N5-%0,5	N5-%0,75
<i>P10-I50</i>	N5-%0,3	N5-%0,5	N5-%0,75	N5-%0,3	N5-%0,5	N5-%0,75	N5-%0,3	N5-%0,5	N5-%0,75

Tabla 2. Escenarios de la Metaheurística.

<i>Escenarios</i>	Número de Centros de Acopio	5			10			15			
		Porcentaje de Exploración			0,3	0,5	0,75	0,3	0,5	0,75	0,3
<i>P3, I10 (1)</i>	Promedio	57	100	32	53	15	33	144	17	32	
	Varianza	91	144	47	27	25	99	419	7	79	
<i>P3, I10 (2)</i>	Promedio	35	73	62	32	21	22	25	24	24	
	Varianza	195	0	0	29	22	30	12	11	27	
<i>P5, I25 (1)</i>	Promedio	35	28	76	55	28	36	22	28	23	
	Varianza	72	44	198	286	22	36	18	13	14	
<i>P5, I25 (2)</i>	Promedio	57	68	36	50	39	95	27	38	19	
	Varianza	112	90	132	27	24	52	4	11	5	
<i>P10, I50 (1)</i>	Promedio	89	57	47	26	20	43	54	30	49	
	Varianza	92	83	44	16	7	29	17	7	23	
<i>P10, I50 (2)</i>	Promedio	56	83	38	36	60	29	61	86	27	
	Varianza	56	67	55	22	16	7	25	11	12	

Tabla 3. Promedio y Varianza para los Escenarios.

5.2.2. Resultados de la Función Objetivo

Con el objetivo de ilustrar el comportamiento de la Función Objetivo en cada una de las Iteraciones y Perturbaciones que se realizaron en cada uno de los escenarios, se tomó como ejemplo la combinación N15-%0,3-P3-I10. En la Figura 16 se puede evidenciar el aumento significativo, a través del tiempo (ticks), de la Función Objetivo antes de la primera Perturbación. En las iteraciones de la Figura 17 se contempla que no hay

cambios significativos, exceptuando en el tick 18 y 19. Por último, en la Figura 18 se observa que no hay mejoría en las iteraciones previas a la tercera Perturbación.



Figura 16. Comportamiento de Iteración P1 (C15-%0.3-P3-I10).



Figura 17. Comportamiento de Iteración P2 (C15-%0.3-P3-I10).



Figura 18. Comportamiento de Iteración P3 (C15-%0.3-P3-I10).

Se puede observar que por medio del procedimiento del ILS se logra una mejora significativa de la Función Objetivo a través de las perturbaciones e iteraciones en esta. Lo anterior se puede observar en la Figura 19, para la combinación que se tomó como ejemplo.



Figura 19. Comportamiento de iteración y perturbación (C15-%0.3-P3-I10).

5.2.3. Eficiencia de la Metaheurística

Teniendo en cuenta que se desea evaluar el asertividad de los resultados de la metaheurística, se realizó el cálculo del Porcentaje de Mejora en la Función Objetivo para cada uno de los escenarios mencionados anteriormente. A continuación, se muestran los resultados.

Escenarios	Número de Centros de Acopio	5			10			15			Pocentaje Promedio	
		0,3	0,5	0,75	0,3	0,5	0,75	0,3	0,5	0,75		
P3, I10 (1)	Solución Inicial	37	61	13	38	9	15	64	9	22	50%	
	Solución Máxima	70	109	39	58	19	42	149	19	40		
	% de mejora	47%	44%	67%	34%	53%	64%	57%	53%	64%		
P3, I10 (2)	Solución Inicial	4	73	62	17	12	8	14,8	15	15		
	Solución Máxima	45	73	62	38	27	27	28	27	28		
	% de mejora	91%	0%	0%	55%	56%	64%	47%	44%	64%		
P5, I25 (1)	Solución Inicial	16	11	30	24	11	14	7	13	11		60%
	Solución Máxima	37	37	89	64	32	42	26	30	27		
	% de mejora	57%	70%	66%	63%	66%	67%	73%	57%	59%		
P5, I25 (2)	Solución Inicial	21	24	12	29	24	56	17	22	9		
	Solución Máxima	68	77	47	53	49	102	28	41	21		
	% de mejora	69%	69%	74%	45%	51%	45%	39%	46%	57%		
P10, I50 (1)	Solución Inicial	35	11	9	13	10	30	1	14	26	61%	
	Solución Máxima	96	65	51	28	21	46	55	36	57		
	% de mejora	64%	83%	82%	54%	52%	64%	98%	61%	64%		
P10, I50 (2)	Solución Inicial	16	37	19	14	38	7	56	63	9		
	Solución Máxima	61	89	55	37	63	30	66	89	30		
	% de mejora	74%	58%	65%	62%	40%	64%	15%	29%	64%		

Tabla 4. Solución Inicial, Solución Máxima y Porcentaje de Mejora para los Escenarios.

Como se puede observar en la Tabla 4, los parámetros P10-I50 son los que presentan mayor mejora en la Función Objetivo, siendo esta la elegida como mejor combinación. Después de analizar los resultados para el porcentaje de mejora de la metaheurística, se procederá a analizar las mejores soluciones de la Función Objetivo para los parámetros elegidos las cuales son: 96, 89 y 89, estas se encuentran en los escenarios N5-%0,3-P10-I50, N5-%0,5-P10-I50 y N15-%0,5-P10-I50 respectivamente. Dichos escenarios pertenecen a diferentes Porcentajes de Exploración, por lo que se puede afirmar que el rango de exploración no tiene efecto sobre la Función Objetivo. De igual manera, se evidencia el impacto que tiene la cantidad de los Centros de Acopio en la Función Objetivo, por ejemplo, cuando se asignan 5 Centros de Acopio el promedio de la mejor solución de la Función Objetivo (65) es mayor que cuando se asignan 10 Centros de Acopio (43) y 15 Centros de Acopio (44). Con el fin de verificar el efecto de los factores e hipótesis propuestas anteriormente sobre los resultados se realizó un ANOVA. Los efectos planteados para el procedimiento anterior se muestran en la siguiente tabla:

Número de Centros de Acopio (A)			Porcentaje de Exploración (B)			Perturbaciones - Iteraciones (C)		
A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
5	10	15	0,3	0,5	0,75	P3-I10	P5-I25	P10-I50

Tabla 5. Factores para ANOVA.

Considerando los factores de la Tabla 5 se realizó un ANOVA con el fin de analizar su efecto en la Función Objetivo. Los resultados se exponen en la Tabla 6. De acuerdo con los resultados expuestos, se puede observar

que el p-value del Factor A (Número de Centros de Acopio) es menor a la significancia (5%), por lo tanto, se puede concluir que el Número de Centros de Acopio sí tiene un efecto significativo sobre la Función Objetivo.

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	20150,398 ^a	26	775,015	1,244	,288
Intersección	140097,227	1	140097,227	224,960	,000
FactorA	5585,731	2	2792,866	4,485	,021
FactorB	786,009	2	393,005	,631	,540
FactorC	298,620	2	149,310	,240	,788
FactorA * FactorB	2711,741	4	677,935	1,089	,382
FactorA * FactorC	3995,463	4	998,866	1,604	,202
FactorB * FactorC	2517,685	4	629,421	1,011	,419
FactorA * FactorB * FactorC	4255,148	8	531,894	,854	,565
Error	16814,625	27	622,764		
Total	177062,250	54			
Total corregido	36965,023	53			

Tabla 6. ANOVA de las Función Objetivo de los Escenarios.

Por otra parte, teniendo en cuenta que el factor A tiene 3 niveles, se realiza la prueba *Least Significant Difference (LSD)* entre esos niveles con el fin de encontrar que cantidad de Número de Centros de Acopio que tiene mayor influencia en la variable de respuesta (Función Objetivo). A continuación, en la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos:

(I) FactorA	(J) FactorA	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
A1	A2	22,0833 [*]	8,31841	,013	5,0154	39,1513
	A3	21,0278 [*]	8,31841	,018	3,9598	38,0958
A2	A1	-22,0833 [*]	8,31841	,013	-39,1513	-5,0154
	A3	-1,0556	8,31841	,900	-18,1235	16,0124
A3	A1	-21,0278 [*]	8,31841	,018	-38,0958	-3,9598
	A2	1,0556	8,31841	,900	-16,0124	18,1235

Tabla 7. Prueba LSD para los niveles del Factor A.

La hipótesis nula de la prueba realizada anteriormente es $H_0: \mu_i = \mu_j$ y la hipótesis alternativa es $H_1: \mu_i \neq \mu_j$. De acuerdo con los resultados obtenidos, en la Tabla 7, se puede observar que el p-value es menor a 5% por lo cual se rechaza la hipótesis nula concluyendo así que $A1 \neq A2$ y que $A1 \neq A3$. Por otra parte, cuando se compara el factor A2 con los niveles A1 y A3, se concluye que las medias de $A2 = A3$. De esta manera, para poder determinar cuál es el nivel del factor que influye en la variable de respuesta se procede a calcular las medias de los niveles. Los resultados se muestran en la Tabla 8:

Variable dependiente: Porcentaje

FactorA	Media	Desv. Error	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
A1	65,306	5,882	53,237	77,374
A2	43,222	5,882	31,153	55,291
A3	44,278	5,882	32,209	56,347

Tabla 8. Media, Desviación e Intervalos de Confianza para los niveles del Factor A.

Finalmente, teniendo en cuenta los resultados expuestos en la tabla anterior, se determina que el nivel más influyente en la función objetivo es el A1 (5 centros de acopio). Lo anterior se debe a que el objetivo del modelo es maximizar la cantidad de personas atendidas minimizando el número de centros de acopio asignados.

5.2.4. Eficiencia de Solución

Con el objetivo de evaluar la eficiencia de las ubicaciones de los Centros de Acopio en cada ejecución de los escenarios, se calculó el número personas afectadas junto con la cantidad personas atendidas por los centros

de acopio. Lo anterior, con el fin de determinar el porcentaje promedio de personas atendidas sobre personas afectadas. En la Tabla 9 se muestran los porcentajes de atención mencionados anteriormente.

Escenarios	Número de Centros de Acopio	5			10			15		
	Porcentaje de Exploración	0,3	0,5	0,75	0,3	0,5	0,75	0,3	0,5	0,75
P3,I10 (1)	Porcentaje de Personas Atendidas de mejor solución del escenario	56%	46%	40%	69%	38%	41%	13%	67%	43%
P3,I10 (2)		23%	40%	35%	72%	40%	30%	69%	31%	46%
P5, I25 (1)		41%	29%	71%	31%	41%	76%	36%	59%	33%
P5, I25 (2)		66%	52%	1%	65%	60%	70%	77%	73%	37%
P10,I50 (1)		72%	11%	49%	45%	32%	46%	33%	30%	29%
P10,I50 (2)		44%	18%	66%	44%	67%	48%	49%	46%	59%

Tabla 9. Porcentaje Promedio de Personas Atendidas.

De acuerdo con la Tabla 9 el mejor escenario es N5-0,3-P10-I50, ya que en la primera ejecución del modelo se evidencia un 72% de personas atendida. Dicho lo anterior las ubicaciones para los Centros de Acopio son: Bello, Apartadó, Itagüí, Envigado y Andes. Si evaluamos el resultado obtenido en la Tabla 8 frente al obtenido en la tabla anterior, se puede concluir que la cantidad de Centros de Acopio adecuada es de 5.

5.2.5. Mejor Solución

Para la elección de la mejor solución se tuvo en cuenta el porcentaje de mejora de los escenarios de la metaheurística, los cuales se encuentran en la Tabla 4. Se pudo observar que en la combinación P10-I50, primera ejecución se presentó el mayor porcentaje de mejora en promedio (69%). Después de seleccionar dichos parámetros se analizó la Tabla 9, con el fin de seleccionar el Porcentaje de Exploración y la cantidad de Centros de Acopio que tuvieron mayor eficiencia en cuanto a personas atendidas. Se evidenció que con 5 Centros de Acopio y un Porcentaje de Exploración de 30%, se obtuvo la mayor atención de personas afectadas por los movimientos en masa, con un porcentaje de atención de 72%.

Una vez se eligió la combinación de parámetros, se establecieron los Centros de Acopio en los municipios de Bello, Itagüí, Envigado, Andes y Apartadó junto con la cantidad de personas que podrían ser atendidas por cada uno de estos. Finalmente, se corrieron 30 simulaciones, cada una para un periodo de 30 años con el fin de evaluar la eficiencia de la ubicación de los Centros de Acopio a largo plazo. La Figura 20 muestra un mapa de calor, donde se evidencian las zonas que presentaron mayor cantidad de avalanchas en las ejecuciones del modelo, la escala de colores se construyó así: rojo 45%, naranja 30%, amarillo 15% y verde 10% del total de avalanchas ocurridas, en la misma figura se representan los 5 Centros de Acopio que con su ubicación podrían llegar a atender hasta un 72% de la población afectada.

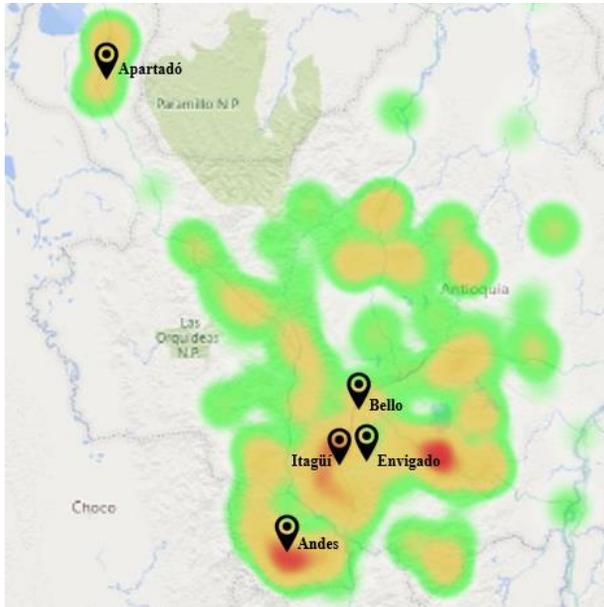


Figura 20. Mapa de calor de cantidad de avalanchas y Ubicación de Centros de Acopio.

Los resultados que se obtuvieron para las simulaciones tuvieron una media de 70,8% con una desviación estándar de 6%. Se realizó un intervalo de confianza (ver Ecuación 6) con el fin de mostrar entre que valores se consideraría una solución adecuada. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que con 95% de confianza el valor de la media se encuentra entre 68,65% y 72,95%. Así mismo, en el 95% de las veces que se construya el intervalo con 30 ejecuciones independientes de la variable aleatoria éste contendrá el valor real de la media.

$$IC = \left[\bar{X} \mp Z_{critico} * \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}} \right]$$

$$IC = [68,65; 72,95]$$

Ecuación 7. Intervalo de Confianza.

Por otra parte, con el fin de analizar descriptivamente los datos, se realizó un Diagrama de Caja y Bigotes a los porcentajes de cobertura de la población afectada obtenidos en los 30 escenarios. Inicialmente se calcularon los siguientes estadísticos: cuartil 1 (percentil 25), cuartil 2 (mediana), cuartil 3 (percentil 75) y cuartil 4 (percentil 95). Dichos estadísticos se muestran en la Tabla 10 y están representados en la Figura 21. Es posible observar que la mayoría de los datos se encuentran distribuidos dentro de los valores 66% y 75% con una media de 70,08%, alcanzando un valor mínimo de 64% y un valor máximo de 81%. Así mismo, se observó que no hay datos atípicos, por lo cual se puede concluir que la población atendida por los centros de acopio oscilará entre estos valores. Con lo anterior, se logró establecer que las ubicaciones propuestas tendrán un desempeño aceptable a lo largo del tiempo evaluado.

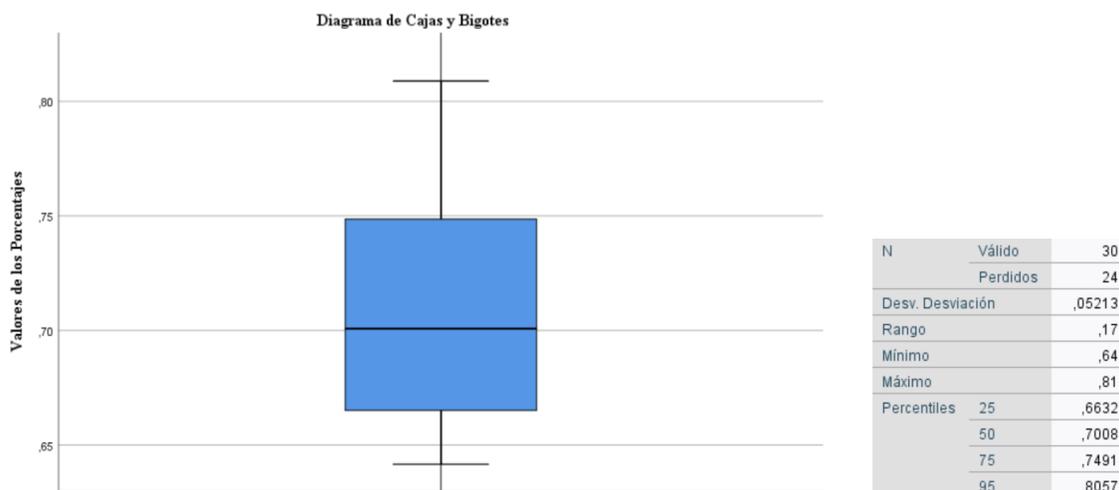


Figura 21. Diagrama de Caja y Bigotes para la Mejor Solución.

Tabla 10. Estadísticos calculados para la Mejor Solución.

5.3. Medición del Impacto

En primer lugar, se evalúa el impacto económico de acuerdo con el CEPAL (2013). Colombia tiene una de las más altas tasas de recurrencia de desastres naturales en América Latina. De esta manera, la ocurrencia de estos fenómenos representa un desafío para el gobierno colombiano en cuanto a la estabilidad fiscal del país. De esta manera, según Banco Mundial (2013) el gobierno reconoció la importancia de reducir el impacto de estos eventos y por eso ha implementado varias medidas para incluir en las políticas y programas de gestión del riesgo.

La estrategia financiera que diseñó el Gobierno de Colombia fue implementar la Ley 819 de 2003. Dicha ley obliga a las instituciones a incluir en el presupuesto recursos para cubrir los daños generados por la ocurrencia de fenómenos naturales. En la Tabla 11, se muestra la obligación financiera estimada que debe tener el Ministerio de Hacienda y Crédito Público (MHCP) frente a dicha problemática. En esta tabla se evidencia que el porcentaje asignado del PIB a los proyectos de infraestructura en desastres naturales es (0.26%), lo que equivale a 171² millones USD.

Obligación contingente	% del PIB
Demandas y conciliaciones	14,04
Proyectos de infraestructura	0,26
Operaciones de crédito público	0,22
Desastres generados por la ocurrencia de fenómenos naturales*	
Portafolio fiscal	1,40

Tabla 11. Obligación Financiera del Ministerio de Hacienda y Crédito Público frente a la ocurrencia de Fenómenos Naturales. Banco Mundial (2013)

Por otra parte, en el año 2014, se inauguró en Medellín el Centro Logístico Humanitario que tiene como propósito fortalecer la atención de emergencias que se presenten en el departamento de Antioquia. El centro inaugurado, es un instrumento que, permitirá que las entidades pertenecientes al Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres puedan coordinar la logística frente a cualquier emergencia que se pueda presentar. Es importante mencionar que el aporte económico que realizó la UNGRD en el Centro Logístico fue de 700 millones COP (UNGRD, 2014). Sin embargo, si se tiene en cuenta el estado y el diseño de las vías y carreteras de Colombia con las que se cuentan hoy en día, un solo centro logístico no puede garantizar la atención inmediata a desastres para todo un departamento, por lo cual, en vez de tener únicamente un solo Centro Logístico Humanitario se proponen 5 Centros Acopio en las ubicaciones señaladas en la figura 20.

² Dato calculado a partir del PIB 2019, Banco De la Republica (2020)

Con el fin de evaluar económicamente el proyecto, se tuvieron en cuenta los costos del inventario y mantenimiento que generarían la cantidad de centros de acopio propuestos. De esta manera, considerando la investigación realizada por Cantillo, V. y Cotes, N. (2019), los costos de mantenimiento e inventarios anuales se estimaron en 0.65 y 0.59 millones USD respectivamente. Por otra parte, el aporte económico que realizó la UNGRD para construir el Centro Logístico fue aproximadamente 0.26 millones USD. De esta manera, teniendo en cuenta los costos mencionados anteriormente, se estima que la inversión inicial para construir los 5 centros de acopio propuestos es de 1.3 millones USD. Considerando el horizonte de tiempo para el cual se realizó la simulación (30 años) la inversión total para llevar a cabo la ejecución del presente proyecto es de 44.1 millones USD, lo que representa el 26% del presupuesto del 2019 para los Proyectos de infraestructura a cargo del MHCP. La implementación de este proyecto permitirá ofrecer una atención oportuna y de calidad a las personas afectadas por los desastres naturales, especialmente por los movimientos en masa, garantizando una atención de al menos el 70% de las personas afectadas.

En segundo lugar, se evalúa el impacto social del presente proyecto. De acuerdo con los resultados, con la solución presentada, a corto plazo se logran atender a 479 de 661 afectadas, esto equivale a un 72% de personas atendidas. Después de realizar la simulación 30 escenarios de 30 años se obtuvo en promedio de personas atendidas es 43.175 personas de 60.581, esto equivale al 71,2% de personas atendidas.

Finalmente, se evalúa el impacto operacional. Según la Secretaría Seccional de Salud y Protección Social (2019), en general los municipios de departamento de Antioquia no cuentan con una buena infraestructura ni personal para desarrollar actividades de inspección y vigilancia, asesoría y asistencia técnica que permitan brindar una atención oportuna y significativa en caso de emergencia. A pesar de las limitantes con las que cuenta el departamento se han venido desarrollados planes para ser más efectivos en una emergencia, entre ellos se encuentra la aplicación del Reglamento Sanitario Internacional (2005) – RSI, plan que permite a los municipios el fortalecimiento de sus capacidades básicas, actualmente más del 50% del territorio cuenta con el RSI.

Por otra parte, Antioquia tampoco cuenta con infraestructura suficiente para el almacenamiento correcto de sangre, que es uno de los insumos fundamentales al momento de atender oportunamente un desastre. Sin embargo, acciones tales como la difusión en medios masivos para incentivar a la población a donar sangre e información diaria a los hospitales sobre la disponibilidad de sangre al Centro Regulador de Urgencias, Emergencias y Desastres – CRUE, son algunas medidas que se han venido desarrollando con el fin de mitigar el impacto que podría tener una emergencia.

Por lo tanto, sabiendo que Antioquia está entre los departamentos que más movimientos en masa tiene y conociendo su déficit hospitalario, la creación de los 5 Centros de Acopio propuestos en este proyecto, permitirá mejorar la atención oportuna en caso de emergencia dado que los centros de acopio podrán brindar atención primaria por medio de la entrega de ayudas humanitarias no alimenticias (UNGRD, s.f.) y botiquines a las personas afectadas por los movimientos en masa. Con lo anterior, se logrará disminuir el flujo poblacional en los hospitales, y, por consiguiente, aumentará la población que podrá ser atendida en una situación de emergencia.

6. Conclusiones y recomendaciones

Este proyecto buscó abarcar una problemática importante para Colombia, la cual son los deslizamientos de tierra provocados por movimientos en masa y su afectación general a la población vulnerable. Este tipo de desastre hidrometeorológico es el que más muertes ha causado en el país en los últimos años. Para ello, en el presente proyecto se propuso una solución para mitigar esta problemática desde la ingeniería, construyendo una metodología que tiene como objetivo la ubicación de Centros de Acopio para distribuir ayudas humanitarias a la población afectada por movimientos en masa en una región o departamento de Colombia. Esta metodología consta de la interacción de una metaheurística y de la simulación de un modelo basado en agentes, en donde al obtener una solución por parte de la metaheurística, esta es evaluada en el modelo de simulación, teniendo en cuenta toda la aleatoriedad que se encuentra inmersa en este tipo de situaciones ya que no se sabe en qué momento ni donde ocurrirá algún desastre natural de esta clase. En este proyecto se estudió el caso del departamento de Antioquia, para el cual se pudo obtener una buena solución en términos del cumplimiento de los objetivos planteados al comienzo del proyecto.

En primer lugar, las pruebas estadísticas realizadas permitieron demostrar que el modelo de simulación logra representar la realidad de la generación de movimientos en masa y la afectación de estos a las poblaciones cercanas. Para esto se realizaron una serie de pruebas de hipótesis de diferencia de medias, en donde se logró demostrar que los datos de la simulación se adaptaban a los datos históricos de movimientos en masa sucedidos

en Antioquia en los últimos 31 años. Con esto se buscó asegurar que el desempeño en la simulación (porcentaje de personas atendidas) obtenido de las soluciones establecidas por la metaheurística fuera lo más representativo de la realidad, como si estos Centros de Acopio fueron verdaderamente instalados en Antioquia.

En segundo lugar, con el fin de realizar una metaheurística adecuada, se definieron diferentes escenarios para encontrar la combinación de parámetros (número de centros de acopio, porcentaje de exploración y número de perturbaciones e iteraciones) que maximizaban la función objetivo. De acuerdo con la prueba estadística ANOVA realizada para los resultados de la función objetivo, se demostró que el número de Centros de Acopio sí tiene efecto sobre la variable de respuesta. Dicho lo anterior se puede afirmar que para tener una mayor cobertura minimizando los centros de acopio (FO), es preferible tener menos centros de acopio con mayor capacidad, en lugar de tener varios centros con menor capacidad.

En tercer lugar, la combinación de parámetros que permitió encontrar el valor máximo de la función objetivo fue 5 Centros de Acopio con 10 perturbaciones, 50 iteraciones y un porcentaje de exploración de 30%, obteniendo un porcentaje de atención del 72%. Teniendo en cuenta que uno de los objetivos del presente trabajo era determinar el desempeño de las ubicaciones de los centros de acopio a largo plazo, se ejecutaron 30 simulaciones cada una en un lapso de tiempo de 30 años para dicha solución. Con los resultados obtenidos se pudo afirmar que con la ubicación de los centros de acopio será posible atender, en promedio, al 70% de la población afectada por movimientos en masa, lo cual es un porcentaje significativo en términos de cobertura. Lo anterior es debido a que gracias a los Centros de Acopio será posible atender de forma más inmediata a la población afectada, disminuyendo los posibles perjuicios a la salud que puedan tener lugar si no se les presta una atención en las primeras horas después de sucedido el desastre.

Al realizar las simulaciones del modelo, se evidenció que, a mayor tiempo de ejecución mayor realismo tendrán los resultados. La combinación de parámetros que presentaron una mayor mejora y eficiencia en la atención de personas afectadas por los movimientos en masa, tuvieron un tiempo de ejecución de aproximadamente 12 horas. La cantidad de perturbaciones e iteraciones que se realizaron en la simulación, comparadas con las que normalmente se ejecutan en un modelo estocástico, como el que se planteó, es pequeño. Sin embargo, el modelo propuesto presentó un porcentaje de mejora del 69%, aun sabiendo que se tuvo una limitante en la capacidad de cómputo, ya que como se mencionó anteriormente en algunos casos cada ejecución tenía una duración mayor a 12 horas y se realizaron aproximadamente 72 ejecuciones que incluían la interacción entre simulación y metaheurística.

Como aspectos para tener en cuenta para futuros trabajos se plantea la posibilidad de utilizar la metodología propuesta en otra región o departamento de Colombia para la ubicación de centros de acopio ya sea para repartir ayudas humanitarias o algún otro tipo de bien. Así mismo, sería interesante incluir en el modelo de simulación aspectos como las distancias y los tiempos entre municipios teniendo en cuenta el estado y diseño de las vías en Colombia, abarcar un problema de planeación inventarios para las ayudas que serán almacenadas y distribuidas por los centros de acopio, simular un caso en el que se dé la distribución de ayudas para establecer un plan de ruteo, y por último, incluir aspectos socioculturales de las personas afectadas por el desastre, por ejemplo, analizar el comportamiento de la población en situaciones de emergencia con el objetivo de obtener una evaluación de desempeño más sujeta a la realidad.

Finalmente, la posibilidad de evaluar desastres naturales de forma realista a través de modelos de simulación basada en agentes permite un análisis integral de las causas y efectos de estos. Contar con sistemas capaces de integrar sistemas de información geográficos; simulación de fenómenos (naturales y sociales) y técnicas de optimización facilita la toma de decisiones para la gestión de riesgos permitiendo integrar los niveles operativos, tácticos y estratégicos. El presente trabajo busca no solo sugerir posibles ubicaciones de centros de acopio que potencialicen las capacidades de atención en los municipios de Antioquia, sino también mostrar la aplicación de nuevas metodologías para la gestión estratégica del riesgo en el país; esto dado que permite la adaptación rápida a otros departamentos.

Referencias

- Afshari, H., McLeod, R., ElMekkawy, T. y Peng, Q. (2014). Distribution-service network design: An agent-based approach. *Procedia CIRP*, 17, pp. 651–656. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.094>
- Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo. (2013). *Guía operativa para la respuesta directa de salud en desastres*. Recuperado de http://www.aecid.es/galerias/que-hacemos/descargas/Guia_Operativa_Respuesta_Salud_AECID_vInteractiva.pdf
- Amaran, S., Sahinidis, N.V., Sharda, B. et al. *Ann Oper Res* (2016) 240: 351. <https://doi.org/10.1007/s10479-015-2019-x>
- Banco de la república (2020). Boletín de indicadores económicos. Recuperado de <https://www.banrep.gov.co/economia/pli/bie.pdf>
- Banco Mundial. (2012). *América Latina, disminuyendo el riesgo ante desastres*. Recuperado de <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2012/10/09/desastres-naturales-america-latina-crecimiento-riesgo>
- Banco Mundial. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia, un aparte para la construcción de políticas públicas*. Recuperado de www.bancomundial.org/co
- Banco Mundial (2013) *Colombia: Estrategia de política de gestión financiera pública ante el riesgo de desastres por fenómenos de la naturaleza*. Recuperado de https://www.gfdr.org/sites/default/files/publication/Colombia_Estrategia_de_Pol%C3%ADtica_de_Gesti%C3%B3n_Financiera_P%C3%BAblica_ante_el_Riesgo_de_Desastres_por_Fen%C3%B3menos_de_la%20Naturaleza.pdf
- Banco Mundial. (2019). *Promedio detallado de precipitaciones (mm anuales)*. Recuperado de <https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.LND.PRPC.MM?locations=CO&view=map&year=2014>
- Boonmee, C., Arimura, M., & Asada, T. (2017). Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics. En *International Journal of Disaster Risk Reduction* (pp. 485–498). Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.01.017>
- Caunhye, A., Nie X. y Pokharel, S. (2012). Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-Economic Planning Sciences*.
- Cantillo, V. y Cotes, N. (2019). Including deprivation costs in facility location models for humanitarian relief logistics. *Elsevier* (pp. 89-100). Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.seps.2018.03.002>
- CEPAL. (2013). *Valoración de daños y pérdidas: ola invernal en Colombia 2010-2011*. Recuperado de: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/37958-valoracion-danos-perdidas-ola-invernal-colombia-2010-2011>
- Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres. (2015). *Manual de gestión para la reducción del riesgo a los desastres en los procesos de desarrollo municipal*. Recuperado de <https://conred.gob.gt/site/documentos/proyeccionacion/herr/MANUAL-GESTION-REDUCCIONRIESGO-ALOSDESASTRES-PROCESOS-DESARROLLOMUNICIPAL.pdf>
- Corporación OSSO. (s.f.). *Quiénes somos*. Obtenido de Sitio Web Corporación OSSO: <https://osso.org.co/acerca/quienes/>
- Defensa Civil Colombiana. (2016). *Glosario*. Recuperado de <https://www.defensacivil.gov.co/index.php?idcategoria=179>
- DNP. (2018). *Índice municipal de riesgo de desastres de Colombia*. Recuperado de www.dnp.gov.co
- DANE. (2013). *Estimaciones de población 1985-2005 y proyecciones de población 2005 - 2020 total municipal por área*. Recuperado de: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/ProyeccionMunicipios2005_2020.xls
- Doungpan, S., Moryadee, S., U-tapao, C. y Laokhongthavorn, Z. (2018). Analysis of Three Emergency Medical Location Models: A Case Study of Thailand. *International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), New Taipei*, pp. 1-6. Recuperado de <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.javeriana.edu.co/document/8520208>
- EiKady, S. y Abdelsalam, H. (2015). A simulation-based optimization approach for healthcare facility location allocation decision. *Science and Information Conference (SAI), London*, p. 500-505. Recuperado de <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.javeriana.edu.co/document/7237189>
- IDEAM. (s.f.). *Atlas Interactivo – Climatológico*. Recuperado de

- <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>.
- Karatas, M. , Razi,N. y Tozan,H. (2016). A comparison of p-median and maximal coverage location models with Q-coverage requirement.*Procedia Eng.*, 149, 169–176.
- Kasaie,P. y Kelton,W.(2015). Guidelines for design and analysis in agent-based simulation studies. En *Proc. - Winter Simul. Conf. 2* (pp. 183–193). Lulu.
- Khair, F. y Maya, B. (2017). Evaluation of location and number of aid post for sustainable humanitarian relief using agent based modeling (ABM) and geographic information system (GIS). *IOP Conference Series: Earth & Environmental Science*, 109(1), p. 1. Recuperado de <http://ezproxy.javeriana.edu.co:2048/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edb&AN=127143545&lang=es&site=eds-live>
- Li, X., Ramshani, M.y Huang, Y. (2018). Cooperative maximal covering models for humanitarian relief chain management. *Computers & Industrial Engineering*, Volume 119, pp. 301-308. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.04.004>.
- Luke, S. (2013). Essentials of metaheuristics. *Lulu segunda edición*. Recuperado de <https://cs.gmu.edu/%E2%87%A0sean/book/metaheuristics/>
- Macal, C. M., & North, M. J. (2005, December). Tutorial on agent-based modeling and simulation. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005*. (pp. 14-pp). IEEE.
- Ministerio de Protección Social de Colombia (2010). *Resolución 1220 de 2010 por la cual se establecen las condiciones y requisitos para la organización, operación y funcionamiento de los Centros Reguladores de Urgencias, Emergencias y Desastres, CRUE*. Bogotá, D.C.: Ministerio de Protección Social de Colombia.
- Ministerio de Salud. (2018). *Manual buenas prácticas de almacenamiento bodega zona franca del ministerio de salud y protección social ministerio de salud y protección social manual administración de bienes e insumos buenas prácticas de almacenamiento bodega zona franca del ministerio*. Recuperado de: <https://www.minsalud.gov.co/Ministerio/Institucional/Procesos%20y%20procedimientos/ABIM02.pdf>
- Moon, I., Bae, J.,Lee,J.,Kim,D.,Lee,H.,Lee,T.,Cha,W.,Kim,J. y Kim, G. (2015).EMSSim: Emergency medical service simulator with geographic and medical details. *Winter Simulation Conference (WSC), Huntington Beach, CA*, p. 1272-1284.Recuperado de <https://ieeexplore-ieee.org.ezproxy.javeriana.edu.co/document/7408252>
- Mota, M. y Flores De La Mota, I (2017).Applied Simulation and Optimization 2:New Applications in Logistics, Industrial and Aeronautical Practice. Recuperado 10.1007/978-3-319-55810-3
- Murali, P., Ordóñez, F., & Dessouky, M. M. (2012). Facility location under demand uncertainty: Response to a large-scale bio-terror attack. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1), 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2011.09.001>
- P. A. Longley, M. F. Goodchild, D. J. Maguire, and D. W. Rhind, *Geographic Information Systems & Science*, 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011
- Rodríguez-Espíndola, O., Albores, P., & Brewster, C. (2018). Disaster preparedness in humanitarian logistics: A collaborative approach for resource management in floods. *European Journal of Operational Research*, 264(3), 978–993. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.021>
- Rodríguez, O., Albores, P., y Brewster, C. (2018). Disaster preparedness in humanitarian logistics: A collaborative approach for resource management in floods. *European Journal of Operational Research*, 264(3), pp. 978–993. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.021>
- Safeer, M., Anbudayasankar, S.P., Balkumar, K. y Ganesh, K. (2014). Analyzing Transportation and Distribution in Emergency Humanitarian Logistics. *Procedia Engineering*, Volume 97, pp 2248-2258, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.469>
- Salari, M. (2014). An iterated local search for the budget constrained generalized maximal covering location problem. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms in Operations Research*, 13(3), 301-313. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s10852-013-9233-9>
- Sebatli, A., Cavdur, F. y Kose-Kucuk, M. (2017). Determination of relief supplies demands and allocation of temporary disaster response facilities. *Transportation Research Procedia*, Volume 22, pp. 245-254. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.031>.

- Secretaría Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia. (2019). *Salud pública en emergencias y desastres*. Recuperado de <https://www.dssa.gov.co/index.php/analisis-de-la-situacion-de-la-salud/item/981-7-salud-publica-en-emergencias-y-desastres>
- SGC. (2017). *Las amenazas por movimientos en masa de Colombia : una visión a escala 1:100.000*. Bogotá D.C., Colombia.
- Shu, K., Scheffran, J. y Schneider, U. (2017). Optimizing the bioenergy industry infrastructure: Transportation networks and bioenergy plant locations. *Applied Energy*, 192, p. 247–261. <https://doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.apenergy.2017.01.092>
- Talbi, E. (2009). *Metaheuristics from design to implementation*. New Jersey: Estados Unidos: Wiley
- UNGRD. (2014). *Se inaugura Centro Logístico Humanitario en Antioquia*. Obtenido de Sitio web de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres: <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/paginas/noticias/2014/se-inaugura-centro-logistico-humanitario-en-antioquia-.aspx>
- UNGRD. (2016). *Manual de Logística para la Atención de Emergencias*. Recuperado de: http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Manuales/MANUAL_DE_LOGISTICA_PARA_LA_ATENCION_DE_EMERGENCIAS_UNGRD.pdf
- UNGRD. (2015). *Plan Nacional de gestión del riesgo de desastres*. Recuperado de: <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/PNGRD-2015-2025-Version-Preliminar.pdf>
- UNGRD. (s.f.). Estandarización de Ayuda Humanitaria de Colombia. UNGRD. Recuperado de https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/18424/Estandarizaci%C3%B3n_ayuda_hedi_2.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Valencia, V., & Rusnock, C. (2017). Using geographic information systems to improve healthcare services. *IIE Annual Conference Proceedings*, 37-42. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/1951123255?accountid=13250>
- Villada, S. C. (2015). Estas son las cinco tragedias naturales más grandes en Colombia. *El Colombiano*.
- Wenfeng Zhou, & Zhenping Li. (2014). The multi-covering emergency service facility location problem with considering disaster losses . *Institution of Engineering and Technology (IET)*, pp. 9–14. Recuperado de <https://doi.org/10.1049/cp.2013.2249>
- Xie, C. (2018). Research on Logistics Facilities Location Based on GIS. *2nd International Conference on Data Science and Business Analytics (ICDSBA)*, pp. 358–361.
- Zarandi, M. H. F., Davari, S., & Sisakht, S. A. H. (2015). An empirical comparison of simulated annealing and iterated local search for the hierarchical single allocation hub median location problem. *Scientia Iranica. Transaction E, Industrial Engineering*, 22(3), 1203-1217. Retrieved from <https://login.ezproxy.javeriana.edu.co/login?qurl=https%3A%2F%2Fsearch.proquest.com%2Fdocview%2F1704715017%3Faccountid%3D13250>