

**MODELO MATEMÁTICO PARA EL DISEÑO DE REDES DE LOGÍSTICA
HUMANITARIA EN LA CIUDAD DE CALI**

**JUAN SEBASTIAN MANRIQUE FERNANDEZ
MARIA ANGELICA CARDENAS MUÑOZ**

**UNIVERSIDAD ICESI
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**CALI
MAYO 2019**

**MODELO MATEMÁTICO PARA EL DISEÑO DE REDES DE LOGÍSTICA
HUMANITARIA EN LA CIUDAD DE CALI**

**JUAN SEBASTIAN MANRIQUE FERNANDEZ
MARIA ANGELICA CARDENAS MUÑOZ**

Proyecto de Grado para optar el título de Ingeniero Industrial

**Director proyecto
ROLANDO JOSE ACOSTA AMADO**

**UNIVERSIDAD ICESI
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**CALI
MAYO 2019**

Contenido	pág.
GLOSARIO	¡Error! Marcador no definido.
RESUMEN	8
1 Introducción	9
1.1 Contexto, Justificación y Formulación del Problema	10
1.1.1 Situación objeto de estudio	11
1.1.2 Pregunta de investigación	11
1.1.3 Justificación del problema:	12
2 Objetivos	13
2.1 Objetivo del Proyecto	13
2.2 Objetivos específicos	13
2.3 Entregables	13
3 Marco de Referencia	14
3.1 Antecedentes o Estudios Previos	14
3.2 Marco Teórico	16
3.3 Contribución Intelectual o Impacto del Proyecto	20
4. Metodología	21
5. Resultados	22
5.1 Objetivo 1: Revisar la literatura relacionada con la utilización de modelos matemáticos basados en programación lineal, aplicables a la realización de redes de logística humanitaria.	22
5.1.1 Análisis de resultados	24
5.1.2 Conclusiones	27
5.2 Objetivo 2: Realizar modelos matemáticos que permitan la localización de centros de acopio, la determinación de su capacidad y los suministros que debe tener cada uno, utilizando los parámetros de entrada suministrados por el proyecto de grado “Estimación de los impactos sociales y económicos de un terremoto usando regresión lineal múltiple	28
5.2.1 Análisis de resultados	33
5.2.2 Conclusiones	35
5.3 Objetivo 3: Evaluar las diferentes configuraciones que se obtienen al variar la capacidad de cobertura de la red logística	36

Escenario 1	36
Escenario 2	39
Escenario 3	41
Escenario 4	44
5.3.1 Conclusiones:	46
6. Conclusiones generales:	50
7. Limitaciones y Recomendaciones	51
8. BIBLIOGRAFÍA	52
9. ANEXOS	54

Lista de Figuras

Ilustración 1 Análisis de Causas y efectos

Ilustración 2 Mapa- red logística principal

Ilustración 3 Mapa- Escenario 1

Ilustración 4 Mapa- Escenario 2

Ilustración 5 Mapa- Escenario 3

Ilustración 6 Mapas- Escenario 4.1 y 4.2

Ilustración 7 Mapas- Escenario 4.1 y 4.2

Ilustración 1 Análisis de Causas y efectos

Lista de Tablas

Tabla 1 Investigaciones que han utilizado modelos matemáticos para localización de centros de acopio pre-desastre

Tabla 1 Investigaciones que han utilizado modelos matemáticos para localización de centros de acopio pre-desastre

Tabla 2 Identificación y comparación de información relevante de dos proyectos que integran en su desarrollo la modelación matemática y la logística humanitaria

Tabla 3 Habilitación y asignación de centros de acopio - Problema base

Tabla 4 Centros de distribución- Escenario 1

Tabla 5 Habilitación y asignación de centros de acopio - Escenario 1

Tabla 6 Centros de Distribución- Escenario 2

Tabla 7 Habilitación y asignación de centros de acopio - Escenario 2

Tabla 8 Centros de distribución- Escenario 3

Tabla 9 Habilitación y asignación de centros de acopio - Escenario 3

Tabla 10 Resumen de resultados- Escenario 4

Tabla 11 Resumen de resultados- Costos Totales

Tabla 12 Frecuencia de centros de acopio habilitados en los escenarios planteados

Lista de Anexos

Anexo 1. Reporte de Cambios y Ajustes

21

Anexo 2. Instrucciones de Entrega

22

RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo investigativo es desarrollar un modelo matemático y experimentar en él diversos escenarios para la configuración de redes de logística humanitaria para la ciudad de Cali.

Para ello, se realizó una revisión bibliográfica sobre estudios previos relacionados con la implementación de modelos matemáticos en el área de logística humanitaria, esto contribuyó en la identificación de los requerimientos para los centros de acopio de ayudas humanitarias y en la estructuración de las restricciones y ayudó a concluir que no existe un estudio que logre interceptar el análisis de ubicación bajo la óptica y metodología de solución del FLP y logística humanitaria, por lo que es un estudio pionero en la ciudad de Cali.

En este proyecto se propone un modelo matemático de programación mixta, se utilizó como base un ejercicio de Uncapacitated Facility Location (Wolsey A, 1988) y posteriormente se añadieron las restricciones y parámetros que se creyeron pertinentes para modelar de una mejor manera el problema que aborda esta tesis, logrando un modelo que determina donde se deben ubicar los centros de acopio, que capacidad deben tener y que comunas deben ayudar, donde se deben ubicar los centros de distribución y a que centros de acopio deben abastecer.

Por último, se concluye que para la situación de emergencia planteada en (Quiceno & Villegas, 2018) se deben abrir 4 centros de acopio en las comunas 1, 12, 20 y 21 de la ciudad de Cali. Además, se muestran otras configuraciones que se obtienen al tener en cuenta otros parámetros y restricciones debido a que la primera configuración se decanta netamente por el factor económico y en un contexto como este también se deben tener en cuenta factores cualitativos de la configuración.

Palabras claves: Modelo Matemático, Logística Humanitaria, Facility Location.

1 Introducción

El objetivo del presente estudio es proporcionar un modelo matemático funcional que permita la configuración óptima de una red de logística humanitaria para Santiago de Cali, en caso de acontezca un terremoto. En este orden de ideas, este proyecto está direccionado hacia la efectividad, pues busca que, en teoría, todas las personas afectadas puedan acceder a las ayudas humanitarias.

Una de las motivaciones para realizar este proyecto es el alto riesgo al que están expuestos los habitantes de la ciudad de Cali de que ocurra una catástrofe provocada por un terremoto de alta magnitud. Un ejemplo de ello son los fuertes sismos que se han registrado en los últimos meses. Según el diario 90 Minutos, los sismos reportados en los meses de enero, febrero y marzo tuvieron una magnitud que osciló entre 4.0 y 6.0 en la escala de Richter (90Minutos, 2019).

Durante el desarrollo de este proyecto se presentan tres fases fundamentales: primero, el análisis de literatura relacionada con la aplicación de modelos matemáticos en proyectos de logística humanitaria, con el fin de identificar aspectos claves que contribuyeran en este estudio. La segunda, consistió en el acercamiento a un nuevo lenguaje de programación, la programación de ejemplos simples hasta llegar a la elaboración del modelo basado en FLP y SCP; además, de la recopilación de información y realización de cálculos que sirvieron como determinantes de las variables de entrada. Finalmente, la ejecución de modificaciones al modelo con el fin de ver y analizar su comportamiento en diferentes escenarios.

El conocimiento y análisis del presente estudio permitirá contribuir de manera significativa en futuros proyectos de investigación e incluso en actualizaciones oficiales del PLEC, dado que la metodología empleada puede replicarse en diferentes contextos o puede tomarse como base para modelar matemáticamente situaciones de mayor complejidad. Así mismo, sirve como una herramienta direccionada hacia la logística estratégica en pro de la mejora continua y de la administración efectiva de los recursos.

1.1 Contexto, Justificación y Formulación del Problema

Los sismos son fenómenos geológicos que se definen como:

“La sacudida brusca del terreno causado por un proceso de liberación súbita de la energía acumulada en la corteza terrestre, que puede resultar en desplazamiento o deformación de partes de la corteza y en la emisión de ondas elásticas que se propagan por el interior de la tierra. Al llegar a la superficie estas ondas producen la sacudida del terreno”. (UNISDR, 2009).

Esta clase de fenómenos geológicos se catalogan como un riesgo intensivo, pues, la exposición de poblaciones y de sus procesos sociales, económicos y culturales a intensos sucesos relativos a las amenazas catastróficas puede causar consecuencias que comprenden gran cantidad de muertes y la pérdida de bienes. (UNISDR, 2009).

Colombia se localiza en la esquina noroccidental de Suramérica, con un área de 1'141.748 km², en que el 35% del territorio está ubicado en la Cordillera de los Andes y en la convergencia de tres placas litosféricas: Nazca, Caribe y América del Sur (placas que constituyen el cinturón de fuego del pacífico), lo que significa que se ve afectada por una variedad de fuentes sísmicas asociadas con la zona de subducción del Pacífico. (Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas , 2012)

La población de Cali está sometida a altos riesgos de que ocurra una catástrofe sísmica de alta magnitud, el riesgo más alto del país, pues hace parte de los municipios con mayor riesgo relativo porque un 95% de su territorio está expuesto a amenazas sísmicas (ilustración 1). Se estima que dentro de los eventos que pueden ser más críticos para el país está la posibilidad de un terremoto, las pérdidas estimadas por sismo con un período de retorno de 500 años serían de US\$ 6.400 millones para Cali. (Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas , 2012)

En la historia sísmica de la región Andina, se encuentran grandes desastres de gran poder destructivo, como los de Suaza (1827), Huila (1967), Popayán (1983), Páez (1994), Tauramena (1995) y Eje Cafetero (1999), entre otros. En el norte del Valle del Cauca, sur del Chocó y Eje Cafetero se presenta sismicidad de profundidad intermedia (entre 66 y 300 km), con eventos de magnitud alrededor de 6,0 a 6,5, que han generado importantes daños en Cali (en 1925). (Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas, 2012)

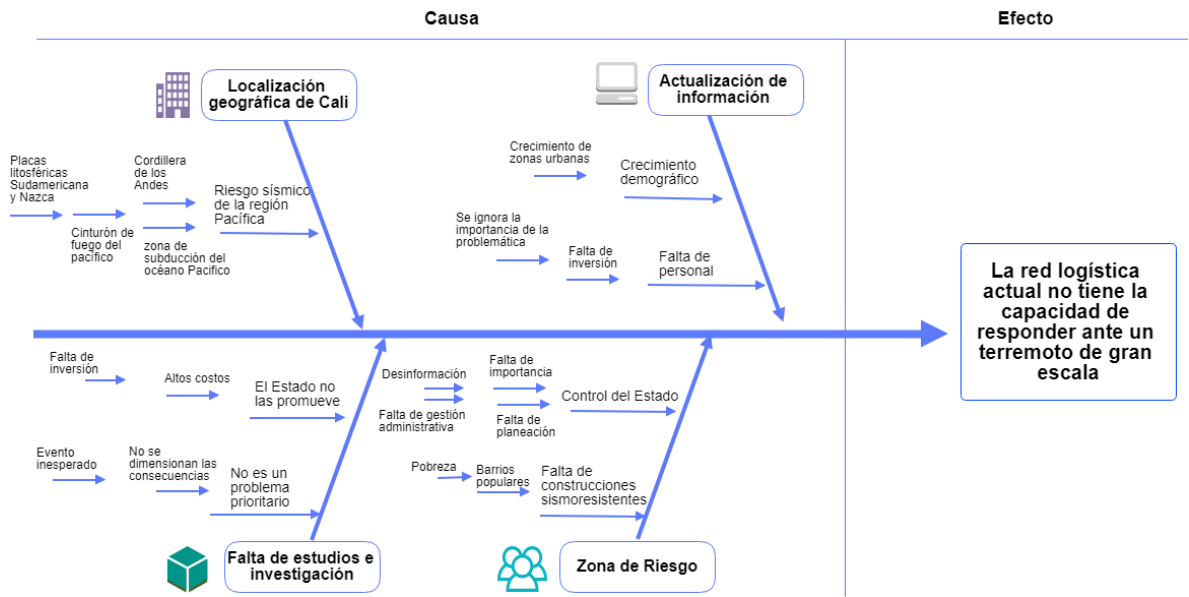


Ilustración 1 Análisis de Causas y efectos

Fuente: Elaboración propia.

1.1.1 Situación objeto de estudio

La ciudad de Cali cuenta con un Plan Local de Emergencias y Contingencias (PLEC), el cual se enmarca en el Plan de Desarrollo de Cali 2008-2011 y se realizó por la necesidad de un reavivamiento de la gestión de riesgos con miras a prevenir, mitigar y tener una mayor velocidad de respuesta ante desastres de carácter natural. El PLEC desarrolló un plan de evacuación ubicando diferentes centros de acopio de ayudas humanitarias en la ciudad de Cali destinados para suministrar las ayudas; además de evacuar y acoger a la población en caso de una posible emergencia. La alcaldía no ha trabajado en la constante actualización y el mejoramiento continuo del PLEC debido a que no cuentan con herramientas que faciliten esta labor, es por esto se considera que el plan de contingencia de la ciudad no está preparado para afrontar un sismo de una gran magnitud. No estar en capacidad de responder a una situación así, puede derivar en una crisis humanitaria y económica.

1.1.2 Pregunta de investigación

¿Qué modelo matemático se debe implementar para encontrar la configuración de una red de logística humanitaria que le permita la ciudad de Cali afrontar

determinadas situaciones de sismos y saber la capacidad de cobertura que pueden brindar?

1.1.3 Justificación del problema:

La necesidad de contar con modelos matemáticos que permitan el diseño de redes de logística humanitaria para la ciudad de Cali es de carácter fundamental, esto con el fin de mejorar la eficiencia de los planes de contingencia actuales. Además, este proyecto aportará una herramienta integral que será útil desde el ángulo de la logística estratégica para la atención a desastres, con el fin de salvaguardar la vida de los seres vulnerables frente a una catástrofe; esto, mediante la mejora de la gerencia efectiva del riesgo; proporcionando una herramienta visual que presentará centros de distribución y el número de centros de acopio habilitados, sus respectivas comunas asignadas y la ubicación estratégica, según el nivel de riesgo y vulnerabilidad que presentan las diferentes comunas de la ciudad.

El beneficio de la realización de este trabajo de investigación se direcciona hacia la toma de decisiones en cuanto a las labores de apoyo y articulación de recursos en situaciones hipotéticas de emergencia, que la administración municipal debe de gestionar para incrementar la efectividad y la rapidez de respuesta ante eventualidades catastróficas, pues “El riesgo de terremoto es hoy en día un riesgo global”. Prof. Dr. Jochen Zschau.

2 Objetivos

2.1 Objetivo del Proyecto

Proporcionar un modelo matemático funcional que permita el diseño de redes de logística humanitaria para la ciudad de Cali.

2.2 Objetivos específicos

1. Revisar la literatura relacionada con la utilización de modelos matemáticos basados en programación lineal, aplicables a la realización de redes de logística humanitaria.
2. Realizar un modelo matemático que permitan la localización de centros de acopio de ayudas humanitarias, la determinación de la capacidad de atención y la localización de los centros de distribución que los abastece.
3. Realizar como mínimo 4 experimentos diferentes en el modelo que nos permitan evaluar escenarios.

2.3 Entregables

1. Informe de la literatura de interés para el proyecto.
2. Modelo matemático que permita la localización y la capacidad de los centros de acopio utilizando los parámetros de entrada suministrados por proyecto de grado mencionado.
3. Análisis de los diferentes escenarios que se obtienen al variar parámetros y restricciones del modelo

3 Marco de Referencia

3.1 Antecedentes o Estudios Previos

El presente proyecto se encuentra en el campo de la logística humanitaria, en este marco se encontraron diferentes autores que convergen en que la logística humanitaria se divide en 4 fases: mitigación, preparación, respuesta y recuperación. Estos autores clasifican las fases de mitigación y preparación como el pre-desastre y tienen como objetivo mitigar los daños que estas situaciones pueden causar, mientras que a las fases de respuesta y recuperación las clasifican como post-desastre y tienen como objetivo ayudar a los afectados de la mejor manera posible y restaurar los daños que el desastre causó, (Galindo & Batta, 2013; Haddow, Bullock, & Coppola, 2003; Altay & Green, 2006).

Cada una de estas fases ha sido objeto de distintos estudios que buscan mejorar para poder aplicarlas a distintos contextos del mundo. Según el estudio de Altay y Green (2006) que posteriormente fue complementado por Galindo y Batta (2013) se han publicado más de 264 artículos sobre la gestión de emergencias y según concluyó (Van Wassenhove 2006) aproximadamente el 80% de estos estudios se refiere a actividades logísticas. De estas actividades logísticas (Renaud y Ruiz, 2014) encontraron que más del 33% de los trabajos van dirigidos a la fase de respuesta, principalmente orientados a la ubicación y manejo de refugios, centros de distribución, personal de asistencia médica, equipos de rescate, etc.

Dado que la presente investigación se ubica en la utilización de modelos matemáticos para localización de centros de acopio, se considera de vital interés el estudio de (Anaya-Arenas, Renaud, & Ruiz, 2014), en el cual se realizó un análisis de la literatura que ha trabajado en este campo, para esto clasificaron los documentos en dos categorías según el punto donde los autores ubicaron su estudio en la línea de tiempo, antes o después de la ocurrencia del desastre. Los resultados que son de interés para la presente investigación, los ubicados antes del desastre, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Investigaciones que han utilizado modelos matemáticos para localización de centros de acopio pre-desastre

Fuente: Adaptada de (Anaya-Arenas, Renaud, & Ruiz (2014))

Article	Características del modelo						
	Datos del modelo	Objetivo	Productos	Limite de capacidad	Abastecimiento	Asignación de recursos	Resolución del modelo
Shereali et al. (1991)	Estático	Individual	Individual	Si	Multi	Si	Exacto
Wilhelm and Srinivasa (1996)	Estocástico	Individual	Individual	Si	Individual	Si	Heurístico
Drezner (2004)	Estático	Multi	Individual	No	Multi	No	Exacto
Drezner et al. (2005)	Estático	Multi	Individual	No	Multi	No	Heurístico
Kongsomsak sakul et al (2005)	Estático	Individual	Individual	Si	Multi	Si	Heurístico
Balocik and Beamon (2008)	Estocástico	Individual	Multi	Si	Multi	Si	Exacto
Chang et al (2007)	Estocástico	Individual	Multi	Si	Multi	Si	Heurístico
Rawls and Turnquist (2010)	Estocástico	Individual	Multi	Si	Multi	Si	Heurístico
Gomez et al (2010)	Estático	Multi	Individual	Si	Multi	Si	Exacto
Nagurney et al (2011)	Estocástico	Individual	Individual	Si	Multi	Si	Exacto
Rawls and Turnquist (2011)	Estocástico	Individual	Multi	Si	Multi	Si	Exacto
Li et al (2011)	Estocástico	Individual	Multi	Si	Multi	Si	Exacto
Campbell and Jones (2011)	Estocástico	Individual	Individual	Si	Individual	Si	Exacto
Hong et al (2012)	Estático	Individual	Individual	Si	Individual	Si	Exacto
Rawls and Turnquist (2012)	Estocástico	Individual	Multi	Si	Multi	Si	Exacto
Yushimito et al (2012)	Estático	Individual	Individual	No	Individual	No	Heurístico
Bozorgi Amiri et al. (2012)	Estocástico	Individual	Multi	Si	Multi	Si	Heurístico
Zhang et al (2013)	Estático	Multi	Individual	Si	Individual	Si	Heurístico
Dalvis et al. (2013)	Estocástico	Individual	Individual	Si	Multi	Si	Exacto

De todo lo expuesto anteriormente se observa que aunque existen varios trabajos enfocados a la etapa pre-desastre, expuestos en la Tabla 1, la investigación que predomina es la de modelos para realizar una gestión de la emergencia después de ocurrido el evento, en la fase de respuesta. Esto se da principalmente por la necesidad de obtener los datos del terremoto para poder desarrollar el modelo. En cuanto a los modelos realizados antes de que ocurran los desastres, (Anaya-Arenas et al., 2014) encontraron que los artículos de este tipo presentan una estructura tradicional del Facility Location Problem (FLP). Estos son principalmente modelos estocásticos exactos que optimizan un solo objetivo, durante un periodo, con un solo paquete de productos, poniendo límites de capacidad en los posibles sitios de localización y con múltiples abastecimientos.

En estudios más recientes, aún en el ámbito internacional, se encuentra (Benavente, 2018), quien llevo a cabo una investigación similar a la del presente proyecto, pero en una ciudad de Perú. En su tesis propuso la cantidad y ubicación de almacenes de ayuda humanitaria, además del plan de distribución de bienes de ayuda para la población damnificada, pero sin disponer parámetros de entrada, lo cual dificultó la realización de la tesis, pero con su propuesta logró conseguir una mayor cobertura, mayor dinamismo y menor tiempo de respuesta frente a un escenario con los planes vigentes. Otros autores son (Iniestra, Arroyo López, &

Enríquez Colón, 2012) quienes trabajaron en un modelo de programación lineal implementando dos criterios, costo y tiempo total para la evacuación, con el fin de definir el número y localización de centros de acopio de ayudas humanitarias y centros de distribución. Para este proyecto el autor tampoco contaba con parámetros de entrada, por lo que definió las variables de entrada mediante un análisis geográfico, que consistió en la superposición de mapas direccionados hacia el objeto de estudio, al final el autor tuvo como resultado la mejora del plan de emergencias local, se incrementó la cobertura y se optimizaron la asignación de individuos a los alberges y las rutas de evacuación.

Estos autores realizaron investigaciones que comparten la necesidad de hacerle frente de una forma eficiente y eficaz a posibles catástrofes mediante planes de contingencia, pero ninguna de las dos regiones tiene tan alto riesgo de terremoto como la ciudad de Cali. Además, ambas tienen el limitante de no contar con los parámetros de entrada, por lo que tuvieron que encontrar maneras no tan especializadas de generar estos datos.

En cuanto a la bibliografía nacional, no se encuentra mucho material, la cantidad y resultados de las investigaciones realizadas en el país muestran que todavía hay mucho terreno por explorar, lo cual hace evidente la necesidad de avanzar en este campo. La investigación más afín al presente trabajo es (Reyes-rubiano, Quintero-araújo, & Torres-ramos, 2014) quienes caracterizaron y formularon un modelo matemático que permitió la programación y el ruteo de personal en una situación post-desastre. Sin embargo, este antecedente trabaja la gestión de la emergencia desde la fase de respuesta (post- desastre) y en general no se encontró con bibliografía a nivel nacional que trabajara este campo desde una de las fases pre-desastre.

Por último, otro artículo de interés para la presente investigación fue un estudio previo donde se estimaron las consecuencias esperadas de un terremoto utilizando regresión lineal múltiple (Quinceno & Villegas, 2018) y a partir de esto se generaron unos mapas de riesgo de la ciudad de Cali. Esta investigación pretende tomar sus resultados como entradas para el modelo matemático.

3.2 Marco Teórico

Los terremotos tienen una característica muy particular, no se pueden impedir. Este hecho representa un reto a nivel estratégico para la sociedad, pues genera la necesidad de desarrollar planes de acción enfocados en la gerencia efectiva del riesgo, con el fin de atenuar consecuencias devastadoras. En este tipo de situaciones, se vuelve imprescindible garantizar que la ayuda adecuada llegue, de manera eficiente y efectiva, a las víctimas de la emergencia (Cozzolino, 2012). Sin embargo, a este tema no se le dio importancia sino hasta el tsunami asiático

(Indonesia, 2004). Inmediatamente después, los bienes de socorro llenaban aeropuertos y almacenes en las regiones afectadas, las agencias de ayuda luchaban por clasificar, almacenar y distribuir las toneladas de suministros y deshacerse de lo que no servía (Thomas y Kopczak, 2005), desaprovechando tiempo, espacio y recursos que hubiesen podido ser invertidos en salvar más vidas. Hechos como este, conducen a que la población tome conciencia, genere medidas de prevención y establezca planes de acción. Así, se tendrá la capacidad de reducir las congestiones, atascos, escasez y demoras en caso de un siniestro.

Por ello, los fundamentos de esta investigación giran y se dirigen alrededor de conceptos teóricos y matemáticos; que abarcan el riesgo, la gestión del riesgo de desastres, logística e investigación de operaciones. Esto se realiza con el fin, de contribuir al desarrollo de una red de logística humanitaria, diseñada mediante programación matemática.

El **riesgo** es la probabilidad de que ocurra un evento que genere consecuencias negativas. Surge al combinar un factor de amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos (Lavell, 2001). Asimismo, cuando se refiere a una **amenaza** se alude a la existencia de un peligro latente, ligado a la posibilidad de que ocurra un fenómeno físico que cause graves daños y pérdidas (UNGRD, 2017). Por otra parte, la **vulnerabilidad** hace mención de la susceptibilidad que tiene una sociedad a sufrir efectos negativos y/o devastadores en caso de que un suceso físico y peligroso ocurra (ibídem).

Teniendo en cuenta el contexto de este estudio, es fundamental concientizarse sobre el nivel de vulnerabilidad que se presenta en la ciudad de Cali, ya que existe una gran probabilidad de que ocurran fuertes terremotos. Lo que justifica la importancia que tiene la administración del riesgo y la implementación de esquemas estructurados, basados en la logística humanitaria; como herramientas de mitigación, preparación, respuesta y recuperación ante eventos desastrosos.

Según el artículo 1º de la Ley 1523 de 2012 del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo, la **gestión de riesgo de desastre**:

“Es un proceso social orientado 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” (p.13).

Con lo anterior, se concluye que la gestión de riesgo implica identificar y conocer los riesgos, implementar acciones en pro de su reducción y generar procesos que contribuyan con el manejo de los desastres. Aquí, entra un nuevo conjunto de conceptos comprendido por el término de desastre, catástrofe y emergencia; cuya diferenciación es clave para el desarrollo de esta investigación.

El **desastre** es la materialización de los riesgos en la sociedad. Esta realización ocurre en el momento en que una determinada amenaza natural, como un terremoto, ocurre y genera consecuencias en términos de pérdidas y daños. (Lavell, 2001).

Es importante destacar que según la Ley 1523 de 2012 del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo, la declaratoria de la existencia de situaciones de desastre la realiza el presidente de la República. Los gobernadores y alcaldes pueden declarar situaciones de calamidad pública, si se entiende que esto hace referencia al:

“El resultado que se desencadena de la manifestación evento(s) natural(es) que al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad causa daños o pérdidas, generando una alteración intensa, grave y extendida en las condiciones normales de funcionamiento de la población, en el respectivo territorio, que exige al distrito, municipio, o departamento ejecutar acciones de respuesta, rehabilitación y reconstrucción”. (p. 16)

La **catástrofe** según (Soldano, 2009) es un desastre a gran escala, en donde la capacidad de preparación y respuesta no es suficiente. Se diferencia de los desastres, en que se presenta en un radio territorial mayor, por lo que se emplea en su administración una logística de intervención diferente.

La **emergencia** es una situación que requiere de atención inmediata se distingue por alteraciones fuertes y graves en el normal funcionamiento de la comunidad. (Riesgo, n.d.).

La necesidad de enfrentar este tipo de sucesos genera el interés por desarrollar procesos flexibles que logren brindar respuestas efectivas en caso de una materialización crítica del riesgo. Es en este punto, en el que la logística humanitaria juega un papel fundamental en el desarrollo de este estudio.

Según Thomas y Kopczak (2005) **la logística humanitaria** se define como:

“El proceso de planeación, implementación y control eficiente bajo un costo efectivo del flujo y almacenamiento de bienes y materiales, así como la información relativa, desde el punto de origen al punto de consumo con el fin de aliviar el sufrimiento de las personas vulnerables” (p. 2)

Con el propósito de generar una red de logística humanitaria para la ciudad de Cali, se pensó en emplear herramientas del área de investigación de operaciones, ya que proporciona mecanismos como la programación matemática, algoritmos de optimización, etc. Estos, contribuyen a modelar los sucesos mencionados con anterioridad, y, de esta manera predecir y validar el proceso de toma de decisiones.

De acuerdo con la premisa “en vista de las consecuencias drásticas necesitamos más creatividad e innovación” (Okada, 2011, p.15) es preciso señalar que, a lo largo del tiempo, las contribuciones que se han realizado desde la investigación de

operaciones se han caracterizado por brindar representaciones de sistemas reales, para apoyar en la toma de decisiones que logren soluciones óptimas y de calidad. Las cuales, en un contexto de gestión de desastres, cuentan con ciertas peculiaridades a nivel creativo y de innovación que han permitido generar propuestas que logran marcar la diferencia en procesos de logística humanitaria.

Teniendo en cuenta que la **investigación de operaciones** se define como una rama de estudio que, para brindar un cimiento efectivo en los procesos de toma de decisiones administrativas operacionales, emplea el método científico (Hillier & Liberman, n.d.). Dentro de esta importante rama de la ingeniería industrial, se encuentra un término fundamental dentro de lo que se desea estudiar, los **modelos matemáticos** hacen referencia a la representación idealizada y válida de una situación problema, facilitan la comprensión y estudio del problema, y actúan como un vínculo entre el uso de técnicas matemáticas y herramientas computacionales para el análisis del problema (Hillier & Liberman, n.d.). En consecuencia, se tiene como guía principal dos de los modelos que abarcan problemas de localización: Facility Location Problem (FPL) y Set Covering Problem (SCP):

Según Duarte (2015, p.4) una forma sencilla de explicación y planteamiento del SCP, es:

SCP es un problema clásico, que pertenece a la clase NP-Completo, donde la entrada está dada por varios conjuntos de elementos o datos que tienen algún elemento en común. En general, estos problemas consisten en encontrar un conjunto de soluciones que permitan cubrir en forma total o parcial un conjunto de necesidades al menor costo posible.

Un conjunto de necesidades corresponde a las filas, y el conjunto soluciones a la selección de columnas que cubren en forma óptima al conjunto de filas.

Se define formalmente como:

$A=(a_{ij})$ una matriz binaria (0,1) de dimensiones $m \times n$

$C= (c_j)$ un vector n dimensional de enteros

$M= \{1, \dots, m\}$

$N= \{1, \dots, n\}$

El valor c_j ($j \in N$) representa el costo de la columna j , y se puede asumir que, $c_j > 0$ para $j \in N$. Así, decimos que una columna $j \in N$ cubre una fila $i \in M$ si $a_{ij} = 1$. El SCP busca un subconjunto de columnas de costo mínimo $S \subseteq N$, tal que cada fila $i \in M$ está cubierta por al menos una columna $j \in S$.

Así, el problema de Set-Covering se puede presentar de la siguiente manera:

$$\min(z) = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq 1 \quad \text{tal que, } \forall_i \in M$$

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{si } j \in S \\ 0 & \text{sino} \end{cases}$$

En relación con el FLP, su formulación hace referencia a:

“Problema general de ubicación de instalaciones que implica dos conjuntos dados: un conjunto de clientes y un conjunto de ubicaciones potenciales de instalaciones para atender las demandas de los clientes. El problema es decidir dónde ubicas las instalaciones y como asignar los clientes a las instalaciones operativas”(Bieniek, 2015).

3.3 Contribución Intelectual o Impacto del Proyecto

Este proyecto estructuró nuevos lineamientos para la reformulación de planes de contingencia, ya que proporcionó redes de logística humanitaria para la ciudad de Cali, a partir del desarrollo de un modelo matemático que empleó como variables de entrada o inputs, las salidas del estudio denominado “Estimación de los impactos sociales y económicos de un terremoto usando regresión lineal múltiple” (Quinceno & Villegas, 2018). El hecho de que se contara con ese estudio como base para desarrollo del presente proyecto tiene una ventaja muy representativa: modelar con datos actualizados, basados en los daños y pérdidas que designan los diferentes niveles de vulnerabilidad de las comunas de Cali, lo que, complementado con la presente investigación, se convierte en una herramienta válida de información que contribuye de manera significativa con la actualización del PLEC.

Dentro de la literatura que se ha investigado no hay estudios que hayan implementado, como guía, el modelo de SCP y FLP a procesos de preparación y respuesta (etapas de la logística humanitaria) en Colombia. De este modo, se considera que la contribución de este proyecto es un avance significativo dentro de este ámbito y de valor para la ciudad de Cali.

Finalmente, este proyecto es un importante aporte dentro de la gestión de desastres, pues destaca ubicaciones geográficas potenciales en la ciudad de Cali que contribuyen con la gerencia efectiva del riesgo, lo que, a su vez permite gestionar actualizaciones y modificaciones en el PLEC.

4. Metodología

Dado que el primer objetivo constó del análisis de la literatura relacionada, se inició con el análisis de los dos proyectos con mayores similitudes con el estudio actual (entre la bibliografía que se revisó), por su relación con la ejecución de modelos matemáticos para la localización de instalaciones direccionadas a logística humanitaria; para la recolección de esta información se utilizó la base de datos que nos provee la Biblioteca Virtual de la Universidad Icesi.

Posteriormente se procedió a realizar una tabla comparativa entre los dos proyectos semejantes con el presente estudio, pues integraron la modelación matemática con la logística humanitaria. Esto se realizó con el fin de extraer información útil para el desarrollo del presente estudio. Finalmente se realizó un estudio del proyecto *Estimación de los impactos sociales y económicos de un terremoto usando regresión lineal múltiple* (Quinceno & Villegas, 2018), del cual se obtuvo información relevante que figuró como parte de los parámetros de entrada de esta investigación.

Para el segundo objetivo, se realizó la recolección de los datos de entrada y la información que se extrajo de objetivo anterior. Con base en estos datos se procedió formular el problema de tal forma en la que se facilitó el modelamiento de la situación mediante las herramientas de investigación de operaciones. Posteriormente se procedió a definir la función objetivo, las variables de decisión, las restricciones y los parámetros. Después se programaron todos estos factores en el software de programación matemática GAMS; con esto, se lograron obtener los resultados acerca del modelo.

Por último, el tercer objetivo consistió en aplicar el modelo para evaluar las diferentes configuraciones que se obtienen al variar parámetros, la función objetivo y las restricciones de la red logística. Para realizar esta comparación, se calculó el costo de los centros de acopio gracias a la utilización de la información de costos históricos de servicios públicos y el costo del metro cuadrado construido en Cali. Posteriormente, se realizaron los mapas de las diferentes distribuciones de centros de acopio a las que se llegaron al realizar las variaciones en el modelo. Finalmente, se comparó el costo total y se concluyó en cada escenario.

5. Resultados

5.1 Objetivo 1: Revisar la literatura relacionada con la utilización de modelos matemáticos basados en programación lineal, aplicables a la realización de redes de logística humanitaria.

La revisión de literatura relacionada con modelos matemáticos aplicables a la realización de redes de logística humanitaria fue fundamental para lograr segmentar la información. Lo anterior, con el fin de determinar la valorización y proporción de impacto que tienen las variables en un determinado problema; además de ello, fue fundamental entender, comparar y contrastar otros trabajos similares con los requerimientos del proyecto actual. Es por esto, que se seleccionaron dos estudios que pertenecen a los antecedentes de este proyecto, con el fin de identificar cómo enfrentaron los respectivos autores el planteamiento y solución del modelo, las variables a tener en cuenta, los supuestos, las restricciones, el enfoque estratégico en la toma de decisiones, etc.

1. El estudio realizado en Villahermosa, México (Iniestra et al., 2012) planteó un modelo bi-criterio para la ubicación de centros de acopio y centros de distribución en caso de inundación, en donde se buscó diseñar un plan de evacuación que incluyera la apertura de centros de acopio, la asignación de individuos a estos, y la apertura de centros de distribución.
2. Más recientemente, un estudio realizado en Lima Metropolitana y Callao (Benavente, 2018) empleó programación matemática para la elaboración de un modelo que logró minimizar el impacto social causado por un sismo en la red de logística humanitaria, esto mediante la redistribución de almacenes y planes de ruteo.

También se analizó el proyecto de grado “Estimación de los impactos sociales y económicos de un terremoto usando regresión lineal múltiple” con el fin de realizar la identificación de las variables e información relevante que se implementó como entrada en el desarrollo y formulación del modelo matemático en el presente estudio.

Tabla 2 Identificación y comparación de información relevante de dos proyectos que integran en su desarrollo la modelación matemática y la logística humanitaria

Fuente: Elaboración propia

Proyecto	Objetivo	Selección estratégica para la toma de decisiones	Función objetivo	Restricciones del Modelo	¿Cómo se determinó la cantidad y ubicación de albergues/ puntos de distribución?	Programas empleados
<p>Minimización del impacto social en la ayuda humanitaria ante un sismo en Lima Metropolitana y Callao, optimizando la velocidad de respuesta ante los sectores damnificados, mediante el uso de modelos matemáticos en la redistribución de almacenes y un plan de ruteo eficiente.</p> <p>Benavente, R. (2018).</p>	<p>- Minimizar del impacto social en la ayuda humanitaria ante un sismo en Lima Metropolitana y Callao.</p> <p>- Optimizar la velocidad de respuesta ante los sectores damnificados, mediante el uso de modelos matemáticos en la redistribución de almacenes y un plan de ruteo eficiente.</p>	<p>Se caracterizó, relacionó y esquematizó las decisiones posibles para la selección de la ubicación de almacenes. Esto con base en:</p> <p>- Áreas de decisión para la ubicación potencial de almacén</p> <p>- Áreas de comparación (cobertura, velocidad de respuesta y costo de inversión)</p> <p>- Identificación de incertidumbre</p>	<p>Minimizar la distancia de los nodos a los almacenes temporales, así como la distancia de los almacenes temporales a los fijos.</p>	<p>1. Se activa un almacén temporal siempre y cuando tenga demanda asignada y también limita la cobertura máxima temporal.</p> <p>2. Se restringe una capacidad mínima del almacén temporal.</p> <p>3. Garantía de que se visite cada nodo para que se atienda la demanda</p> <p>4. Definición de variables como binarias</p>	<p>Fase I- Almacenes fijos Programa RStudio para la generación de nodos, se empleo el algoritmo K-medias / k=9 y se ejecutó de nuevo el algoritmo K-9: asignación, tamaño y ubicación a cada nodo de un almacén fijo.</p> <p>Fase II- Almacenes temporales - Generación de 1000 iteraciones con distrib. normal (μ depende de la vulnerabilidad de la zona) y desv. esta = 0.5. - Determinación de un indicador esperado (basado en los damnificados-base de datos) para cada distrito y a cada nodo se le asigna el atributo del indicador esperado dependiendo al distrito al que pertenezca. - En cada iteración se ejecuta el modelo de PL = cantidad y ubicación de almacenes temporales.</p>	<p>- AMPL</p> <p>- Rstudio y algoritmo K-medias</p>
<p>Un modelo BI-CRITERIO para la ubicación de albergues, como parte de un plan de evacuación en caso de inundaciones</p> <p>Iniestra, J. G., Arroyo López, P. E., & Enríquez Colón, R. (2012).</p>	<p>Diseñar un plan de evacuación en caso de inundaciones, el que contiene:</p> <p>1. Apertura de albergues y centros de distribución (incluye inventario)</p> <p>2. La asignación de individuos a albergues y rutas de evacuación.</p>	<p>Determinación y caracterización de sitios potenciales para ser los centros de distribución/ albergues.</p> <p>- Caracterización basada en información de La Cruz Roja: ubicación con un bajo riesgo de vulnerabilidad, fácil acceso, contar con servicios básicos, servicios sanitarios, capacidad de almacenaje, etc.</p> <p>Identificación de vías destinadas a la evacuación de las personas afectadas</p> <p>- Emplear mapas de la zona de estudio, calcularon centriodes (garantizar cobertura) y determinaron las posibles distancias a recorrer</p>	<p>1. Minimizar el costo total: costo de acondicionamiento de albergues y de los centros de distribución, costo del inventario pre-posicionado y costo por transporte</p> <p>2. Minimizar el tiempo total para desalojar a todos los individuos afectados.</p>	<p>1. No exceder la capacidad de los centros de distribución</p> <p>2. No se abre un centro de distribución a menos que se distribuya la cantidad equivalente al 10% de su capacidad</p> <p>3. La demanda de un albergue no excede su capacidad</p> <p>4. Una instalación se acepta como albergue solo si el número de personas que lo utilizan corresponde al menos al 10% de su capacidad</p> <p>5. No exceder al presupuesto preventivo disponible acond. de las instalaciones</p> <p>6. No exceder el presupuesto asignado a situaciones de emergencia</p> <p>7. Todos los afectados se trasladan a algún albergue</p> <p>8. A cada albergue se le abastece de: kits de ayuda para que la población por 4 días.</p> <p>9. Cada albergue recibe suministros de un único centro de distribución</p> <p>10. El 40% de las personas sale de la zona afectada en su automóvil y el resto son evacuada por autobús o helicóptero</p> <p>11. Envío de suministros de ayuda a un albergue desde un centro de distribución sólo si éste se abre</p> <p>12. Restricciones de no-negatividad (cuáles variables son enteras y cuáles binarias)</p>	<p>Etapa I Determinación de centros de distribución que abastecen los albergues</p> <p>Etapa II Con la ayuda del Sistema de Información Geográfico: se emplearon mapas - análisis de la zona y se usaron herramientas de intersección= producción de nuevos mapas, identificación de instalaciones que se podrían usar como albergues, zonas de riesgo de inundación y personas afectadas.</p> <p>Etapa III Estimación de costos para todas las actividades del plan de emergencia- esto se realizó para cada escenario.</p> <p>Etapa IV Resolver el modelo bi-criterio -método de las ponderaciones y complementando con el de la restricción.</p> <p>- A cada escenario le corresponde un modelo de PLE mixto</p> <p>- Cada escenario tiene diferente número de afectados y número de albergues y centros de distribución potenciales</p>	<p>- Solución del modelo matemático Bi- criterio en: GAMS/ utilizando el solver CPLEX), e- restricción y la aplicación del algoritmo Floyd-Warshall</p> <p>- Simulación: Idrisi</p> <p>- Herramientas de sistemas de información Geográfica- de ArcView</p>

5.1.1 Análisis de resultados

Es importante aclarar que en el presente proyecto se asumió la ubicación de centros de distribución que, en caso de un siniestro, enviarán las ayudas humanitarias necesarias a los centros de acopio. Teniendo en cuenta que tanto el estudio realizado en Perú como el de México manejaron ideas con funcionalidades similares, pero métodos de PL diferentes, se extrajeron planteamientos de las metodologías de solución del problema de localización empleadas.

Por ejemplo, en el artículo de Perú, Benavente estructuró su estudio con dos tipos de almacenes: los almacenes fijos, cuya ubicación y cantidad están determinados para manejar un stock permanente de ayudas humanitarias y los almacenes temporales, que en caso de un siniestro recibirían de los fijos las ayudas necesarias para satisfacer la demanda, pues enviarían mensajes de texto a la central de ayudas con la información sobre la criticidad del sismo por zonas, incrementando así el nivel de cobertura y la velocidad de respuesta.

Para iniciar, se elaboró la Tabla 2 la cual abarcó la identificación y comparación entre los dos estudios seleccionados por su similitud con el presente proyecto; a partir de esto, se extrajo información útil para la constitución de ideas sobre el desarrollo de este estudio. En primer lugar, se consideró como factor fundamental el enfoque que cada autor le da a su trabajo en cuanto a las necesidades respecto a los centros de acopio, centros de distribución, albergues o almacenes (conceptos trabajados y que responden a las diferentes necesidades en los artículos analizados).

Un ejemplo de ello fue la priorización que Benavente (2018) le otorgó al concepto de vulnerabilidad, logrando determinar las posibles áreas de decisión que abarcan la ubicación potencial de los almacenes, esto en función a la identificación del componente de incertidumbre y a la caracterización de los almacenes. De esta misma forma, Iniestra y su grupo de colaboradores determinaron los sitios potenciales para ser los centros de distribución/albergues, considerando concepto de vulnerabilidad (con un especial direccionamiento a la infraestructura que podría resultar afectada), la facilidad de acceso y la capacidad de almacenaje.

En este punto es interesante como los dos artículos identifican las características que deben tener los centros de ayuda humanitaria, pues esto es fundamental para esclarecer la ubicación de sitios potenciales, los costos, el nivel de cobertura que se necesita y su directa relación con la capacidad que, en teoría, debería de tener cada centro de acopio. A partir de esto, se consideró necesario realizar priorizaciones sobre las características de los centros de acopio, en función al algoritmo de FLP con el fin de tomar decisiones más acertadas sobre la ubicación de estos.

En el artículo de México (Iniestra et al., 2012) se presenta la elaboración de un modelo de programación PLE mixta que abarcó dos funciones objetivo: el primer criterio busca minimizar el costo total albergues y de centros de distribución en caso de inundación (lo que incluye costos de apertura/ acondicionamiento, costo de

inventario pre posicionado y costos de envío desde el los centros de distribución a los albergues) y el segundo criterio busca minimizar el tiempo total para evacuar a los afectados. Dado que los autores realizaron el estudio para tres niveles de inundaciones, en cada escenario el número de centros de acopio y centros de distribución cambiaba, lo que hizo referencia a un PLE Mixto. Para lograr la distancia mínima entre los centros de distribución y los centros de acopio, ellos emplearon el algoritmo Floyd-Warshall, del cual obtuvieron la optimización gracias a que realizaron el modelamiento del problema en GAMS (con el solver CPLEX). También hicieron uso del método de las ponderaciones, la ϵ -restricción, con lo que determinaron las diferentes estrategias de prevención y encontraron la que mejor se adecuó al factor integrador de la relación costo de implementación/tiempo de evacuación.

En consecuencia, para la concepción de la ubicación de los centros de distribución y los albergues, los autores se apoyaron en operaciones de intersección entre mapas. Para esto se utilizó el software Sistema de Información Geográfico ArcView, con lo que determinaron los lugares estratégicos que podrían utilizarse como centros de acopio. Se tuvo en consideración la minimización de distancias, el número de personas afectadas, la capacidad requerida de los centros de acopio e incluso el número de kits de ayuda humanitaria.

Además, los autores se apoyaron en un estudio de la Comisión Económica para América Latina (CEPAL, 2008) a partir del cual estimaron los costos de abrir los centros de distribución y albergues. También, con esta información procedieron a calcular el costo de transporte multiplicando el consumo de combustible por la distancia. Teniendo en cuenta el objeto del presente proyecto, es de gran relevancia el estudio realizado por Iniestra y su equipo de trabajo, ya que brinda un análisis importante en el uso de modelos de investigación de operaciones integrados a la logística humanitaria de una ciudad, pues logra proporcionar ideas de metodología en cuanto a la estimación de costos y algoritmos de solución mediante GAMS.

Además, determinaron el número de personas afectadas como una variable de su modelo matemático, lo que, a su vez es una entrada del presente proyecto ya que se presenta de forma análoga al número de casas destruidas y el número de muertos. Estas variables se incluyeron en el modelo para estimar la cantidad de ayuda estipulada en función a la demanda, y calcular un aproximado de la capacidad que deben de tener los centros de acopio de ayudas humanitarias. Finalmente, comprende la esencia del presente estudio, al minimizar el costo total de la operación de los centros de acopio y centros de distribución.

En el segundo artículo de estudio, (Benavente, 2018) se elaboró un plan de distribución de bienes de ayuda a las personas damnificadas por un terremoto, en donde la decisión de la ubicación de los almacenes fijos y temporales fue el centro de la investigación. En dicha decisión involucraron varias áreas de comparación, entre las que se encuentran el rango de cobertura, la velocidad de respuesta, los costos y el nivel de incertidumbre que acompaña a cada opción.

Los autores plantearon su proyecto en dos fases, la primera se desarrolló antes de que ocurra el siniestro y conlleva la localización de los almacenes fijos que contienen una cantidad de ayuda humanitaria predeterminada. La segunda fase se desenvuelve en un escenario en el que ya ocurrió el siniestro, por lo que la ubicación de los almacenes temporales debe de estar a la mínima distancia de los fijos y deben de garantizar la cobertura de Lima Metropolitana y Callao.

Para resolver este problema de localización, los autores realizaron dos modelos matemáticos de programación lineal, cuya función objetivo fue minimizar la distancia entre almacenes temporales y fijos. En primera instancia, los autores implementaron el algoritmo de clusterización y K-medias en su proyecto, pues gracias a esto, lograron segmentar la población de Lima Metropolitana y Callao en un número determinado particiones en donde a cada individuo se le asigna el centroide más cercano. (Blanco & Sanz, 2016)

En la segunda fase los autores desarrollaron la idea de enviar información desde cada nodo a una central humanitaria informando el nivel de daño de la zona que cubre, con estos datos se le asigna un “peso” a cada nodo determinando así la ubicación de los almacenes temporales. Y posteriormente, con la ejecución del modelo de ruteo, determinaron la mínima distancia entre los almacenes fijos y temporales.

Lo anterior, ancla un punto de intersección entre el artículo de Benavente (2018) y el desarrollo metodológico empleado por Quinceno & Villegas (2018). Estos últimos, determinaron mediante la longitud y latitud las coordenadas geográficas que contribuyeron al cálculo de la distancia entre el epicentro del terremoto y el centroide de cada comuna de la ciudad de Cali. Lo que, a su vez, representa un punto en común en los datos que se emplearon como entrada en el presente modelo, ya que esta información se empleó indirectamente para determinar el impacto de un terremoto y los requerimientos que presenta cada comuna, para garantizar el nivel de cobertura y velocidad de respuesta. Sin embargo, al ser diferentes proyectos en esencia, difieren en el desarrollo metodológico, en el planteamiento y solución del modelo matemático.

En esta secuencia, cabe resaltar la importancia en la contribución y extracción de información sobre las restricciones de los modelos analizados, ya que ayudaron a valorar la factibilidad de tener en cuenta algunas restricciones en la elaboración del modelo:

1. La demanda de cada una de las comunas debe ser completamente satisfecha por los diferentes centros de acopio
2. El nivel de uso de cada uno de los centros de acopio debe ser menor o igual a su capacidad
3. Determinar una demanda mínima según la capacidad de los centros de acopio

En el trabajo de Quinceno & Villegas (2018), se proporcionó información relevante sobre la evaluación de la vulnerabilidad urbana en la ciudad de Cali en un contexto de ocurrencia de siniestros, logrando incorporar análisis estadísticos de datos representativos y actualizados en la elaboración de modelos, planteados desde la regresión lineal múltiple, con el objetivo de estimar los impactos sociales y económicos de un terremoto.

Los autores llegaron a dos modelos que cumplieron todos los criterios de validación mediante el método de regresión lineal, los cuales predicen el número de muertos (LOG Deaths) y el número de casas destruidas/dañadas (LOG Houses destroyed); además, tuvieron en cuenta la densidad poblacional, la medición de distancias al epicentro y la selección del lugar más cercano al epicentro.

A partir de esto, los autores ejemplificaron el uso de estos modelos en un simulacro propuesto por el PLEC y uno propio para mostrar como cuantificar el impacto económico y social a partir de estos modelos. Lo anterior, fue representado gráficamente por medio de mapas de Cali, que indican cuales son las comunas más afectadas en caso de terremotos, y afirmaron que en estos escenarios la ciudad de Cali no cuenta con los recursos asignados para darle una respuesta a este tipo de catástrofes. Finalmente, según la evaluación que realizaron sobre la pertinencia del PLEC para Cali (mediante la hoja de evaluación de SURATEP), no se encuentra adaptado a los requerimientos actuales de la ciudad.

Partiendo de esta información, se decidió usar los modelos que predicen el número de muertos, el número de casas destruidas/dañadas y los mapas como las entradas de este proyecto, con el fin de satisfacer la necesidad de preestablecer la ubicación de los centros de acopio de ayudas humanitarias.

5.1.2 Conclusiones

Dado que el análisis de los artículos contribuyó en la identificación de los requerimientos para los centros de acopio y en la estructuración de las restricciones, pero no para el planteamiento del modelo en función a los problemas de investigación de operaciones FLC y SCP, pues son otros los modelos base en los que fueron planteados los artículos. Se concluye que no existe un estudio que logre interceptar el análisis de ubicación bajo la óptica y metodología de solución del FLP y logística humanitaria en Colombia, por lo que es un estudio pionero en la ciudad de Cali.

Al resaltar estos artículos, se evidencia la existencia de un enfoque humanitario que gestiona la sostenibilidad de insumos y alimentos para las personas afectadas tras una catástrofe natural. Lo anterior, presenta una serie de necesidades y requerimientos que mediante el desarrollo de modelos de programación lineal se tratan de abarcar y satisfacer.

La homogenización entre el principio de preservación de la vida y la programación lineal permite ampliar la percepción del impacto a nivel social y económico que podría causar un terremoto. Esto expande las opciones que se tienen al plantear y contrastar planes de contingencia que logren salvaguardar la vida de los afectados, lo que, a su vez otorga la posibilidad de identificar oportunidades de mejora y potencializar la toma de decisiones basada en modelos matemáticos.

5.2 Objetivo 2: Realizar modelos matemáticos que permitan la localización de centros de acopio, la determinación de su capacidad y los suministros que debe tener cada uno, utilizando los parámetros de entrada suministrados por el proyecto de grado “Estimación de los impactos sociales y económicos de un terremoto usando regresión lineal múltiple

Supuestos

1. Se determinó un centro de acopio candidato por cada una de las comunas de Cali
2. La ubicación de los centros de acopio candidatos es en el centro espacial de su respectiva comuna
3. El cálculo de costo del transporte se determinó por camión, con las especificaciones determinamos el ACPM que consume al recorrer un kilómetro, a eso le multiplicamos el precio actual del ACPM y la distancia recorrida para ir a la comuna.
4. Para simplificar los cálculos del costo de la distancia no se tuvo en cuenta el tiempo que se demora por trancones ni desvíos por vías cerradas.
5. Se toma como punto de llegada de los suministros y personas el centro de cada una de las comunas.
6. Se determinaron 4 centros de distribución ubicados a lo largo de la ciudad, uno en cada zona, que van a abastecer a los centros de acopio de los suministros correspondientes.
7. Un centro de distribución, obligatoriamente, suple de todos los suministros a un centro de acopio.

Modelo matemático

En el proyecto se implementó un modelo de programación lineal mixta que tiene como función objetivo minimizar los costos totales originados por la construcción, el abastecimiento de los centros de acopio con suministros y el transporte de las personas afectadas hasta estos. Este modelo matemático fue desarrollado a partir del ejercicio de Uncapacitated Facility Location (Wolsey A, 1988) porque se

consideró que esta teoría se adapta correctamente al contexto sobre el cual se está trabajando. Sin embargo, se realizaron cambios en la estructura del modelo propuesto por el autor con el fin de facilitar la adecuación del modelo al contexto de esta tesis. Finalmente, se añadieron las restricciones y parámetros que se creyeron pertinentes para modelar de una mejor manera el problema que aborda este trabajo.

En primer lugar, el modelo busca determinar el número y la ubicación que deben tener los centros de acopio que almacenan los suministros necesarios para suplir esta situación, para esto se determinaron j centros de acopio candidatos. En segundo lugar, reducir los costos que implica el transporte de personas desde las comunas a cada uno de los centros de acopio que abastece. Por último, determinar en qué zonas deberían estar los centros de distribución que van a abastecer a cada uno de los centros de acopio. Para la configuración del modelo matemático se utilizarán los datos de la estimación de una situación de terremoto en la ciudad de Cali realizada en (Quiceno & Villegas, 2018).

Conjuntos e índices

$I = \{\text{Conjunto de comunas de Cali}\}; i \in I$

$J = \{\text{Conjunto de centros de acopio candidatos}\}; j \in J$

$N = \{\text{Conjunto de centros de distribución disponibles}\}; n \in N$

Variables de decisión

X_{ij} : La cantidad de personas heridas de la comuna i atendidas por el centro de acopio J

W_{ij} : La cantidad de personas sin casa de la comuna i atendidas por el centro de acopio J

V_{nj} : $\{1, \text{ si el centro de distribución } n \in N \text{ abastece al centro de acopio } j \in J$

$0, \text{ si el centro de distribución } n \in N \text{ no abastece al centro de acopio } j \in J\}$

Y_j : $\{1, \text{ si el centro de acopio } j \in J \text{ se utiliza}$

$0, \text{ no se utiliza centros de acopio } j \in J\}$

Parámetros

A_{ij} : Costo de ir del centro de acopio j a la comuna i

B_{nj} : Costo de abastecer el centro de acopio j por el Centro de Distribución n

H_i : Número de personas afectadas por casas destruidas en la comuna i

D_i : Número de heridos en la comuna i

C_j : Costo de abrir el centro de acopio j

E_j : Capacidad, en personas, que tiene el centro de acopio j

Función objetivo

Minimizar el costo total de la operación de los centros de acopio. Para calcular este costo total, se multiplica lo que cuesta el desplazamiento de una persona de la comuna i al centros de acopio j , por la cantidad de personas de la comuna i que va a atender el centro de acopio j para el caso de personas heridas y personas sin casa, a esto se le suma el valor de apertura de los centros de acopio que se decidieron abrir y lo que cuesta llevar los suministros desde el centro de distribución a los diferentes centros de acopio.

$$\text{Min} \sum_i \sum_j X_{ij} A_{ij} + \sum_n \sum_j V_{nj} B_{nj} + \sum_j Y_j C_j$$

Restricciones

- (1) La demanda de personas heridas de cada una de las comunas debe ser completamente satisfecha por los diferentes centros de acopio. La suma de todas las personas de la comuna i atendidas por el centro de acopio j deben ser igual a la demanda de esa comuna D_i .

$$\sum_j X_{ij} = D_i \quad \forall_i = 1, 2, \dots, 23$$

- (2) La capacidad de uso de cada uno de los centros de acopio debe ser menor o igual a su capacidad máxima. La suma de todas las personas que atiende

el centro de acopio j de las diferentes comunas i debe ser menor o igual a su capacidad máxima E_j .

$$\sum_i W_{ij} = E_j * Y_j \quad \forall_j = 1,2 \dots, 23$$

- (3) Los centros de distribución sólo pueden abastecer a los centros de acopio que decidan abrir.

$$\sum_n V_{nj} = Y_j \quad \forall_j = 1,2 \dots, 23$$

- (4) Se deben abrir como mínimo K centros de acopio

$$\sum_j Y_j \geq K$$

- (5) Cada centro de acopio abierto debe atender como mínimo M cantidad de personas afectadas.

$$\sum_i X_{ij} + W_{ij} \geq M * Y_j \quad \forall_j = 1,2 \dots, 23$$

(6) $X, W =$ Variables enteras.

(7) $V, Y =$ Variables binarias.

Configuración de los parámetros del modelo

- **A_{ij} , Costo de ir del centro de acopio j a la comuna i :** Para los costos de desplazamiento se calcularon los centroides de cada comuna, de esta manera se determinó la ubicación de cada centro de acopio y con la herramienta Google Maps se encontraron las distancias entre cada uno. Posteriormente, se estableció el precio de la gasolina promedio con el que inicio el año 2019 en Colombia y las especificaciones de consumo de ACPM del bus Chevrolet FRR 2012.
- **B_{nj} , Costo de abastecer el centros de acopio j por el Centro de Distribución n :** La localización de los centros de distribución se seleccionó buscando que los 4 centros limitaran con todas las comunas de Cali, por eso se localizaron en las comunas 3, 5, 13 y 17. Para el costo de desplazamiento se implementaron las mismas consideraciones del parámetro anterior, cambiando el bus Chevrolet FRR por un camión de carga Fotón AUMAN BJ1163 y se tienen en cuenta unos costos logísticos de almacenamiento y gestión de la mercancía de 5 millones.

- **H_i , Número de personas afectadas por las casas destruidas en la comuna i:** El número de casas destruidas se obtiene de una estimación realizada por (Quiceno & Villegas, 2018).
- **D_i , Número de heridos en la comuna i:** El número de personas heridas se obtiene de una estimación realizada por (Quiceno & Villegas, 2018).
- **C_j , Costo de abrir el centro de acopio j:** La metodología que se empleó para la estimación de los costos de apertura de los centros de acopio en cada comuna consistió en el cálculo del valor aproximado de los servicios públicos (acueducto, alcantarillado y energía) y el costo del avalúo del m² construido por comuna. Para lo anterior, se emplearon bases de datos de la alcaldía de Santiago de Cali, reportes sobre el consumo en servicios públicos en la ciudad e informes de la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres.

Para iniciar, se estableció el tamaño del empaque de los kits de ayuda, los que según la Estandarización de Ayuda Humanitaria de Colombia (UNGRD, 2013) son tipo caja y de cartón corrugado, cuyas dimensiones son: 34.2 cm de ancho, 28.4 cm de largo y 24 cm de alto. Teniendo en cuenta esta información, se realizó un supuesto que abarca consideraciones sobre la distribución de planta y el método de apilamiento de las cajas que contienen los kits de auxilio para los afectados por la catástrofe; con lo que se llegó a la configuración de los centros de acopio de 165 m² con una altura de 2.7 m.

Luego se procedió con el cálculo del costo de una edificación de 165 m² en cada una de las comunas de Santiago de Cali, para ello se empleó la base de datos suministrada en el informe Cali en cifras 2016 (Alcaldía de Cali, 2017) , en donde se obtuvo información sobre el estrato socioeconómico moda y el avalúo promedio por m² construido en cada comuna.

A partir de este informe también se logró estimar el valor de los servicios públicos en función al estrato socioeconómico moda en cada comuna. En cuanto al servicio de acueducto y alcantarillado, los caleños pagan un aproximado de \$21.814 a \$69.329 según su estrato (J. Manjarrés; et al., 2006). Y según la información obtenida de EMCALI (Tarifas de energía-Marcado regulado, 2019)), el costo fijo de la energía figura en un rango entre 228 \$/Kwh a 649\$/Kwh. Teniendo como supuesto que un centro de acopio consume 750 Kwh/mes, se estimó que el costo de la energía de un centro de acopio estaría ente \$170.835 y \$486.510 dependiendo del estrato al que pertenezca.

- **E_j , Capacidad que tiene el centro de acopio j:** La capacidad de los centros de acopio se determinó como la capacidad máxima porque se busca tener encontrar la capacidad que el modelo sugiere para cada centro de acopio.
- centros de acopio **mínimos para abrir:** Se busca que el modelo arroje mínimo 4 centros de acopio para tener idea de mínimo 4 puntos clave.
- **Capacidad mínima de cada centro de acopio:** Se determinó que para abrir cada centro de acopio debe atender como mínimo al 10% de la demanda total.

5.2.1 Análisis de resultados

Para la adecuada comprensión de los resultados, es necesario indicar:

- Simbología empleada:

Centro de acopio de ayuda humanitaria:



Centro de distribución:



- Número de centros de distribución y la comuna en la que se encuentra ubicado:

Centro de distribución	Comuna en donde se ubica los centros de distribución
1	5
2	13
3	3
4	17

Al correr el modelo con los parámetros establecidos según lo explicado, la configuración de la red de logística humanitaria para la ciudad de Cali que se obtuvo es la siguiente:

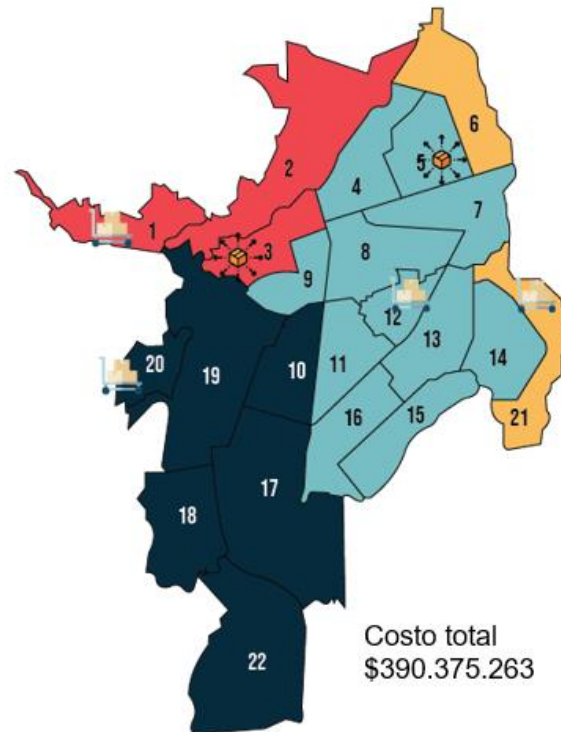


Ilustración 2 Mapa- red logística principal

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la imagen, el modelo se ciñe a abrir el mínimo de centros de acopio que se establecieron inicialmente y el costo total de construir la infraestructura y llevar a cabo la logística humanitaria para gestionar la emergencia planteada por (Quiceno & Villegas, 2018) tendría un costo de aproximadamente \$390.375.263 millones de pesos. En cuanto al modelo, para tener una idea de la capacidad que debería tener cada uno se decidió implementar el modelo sin restricción de capacidad, cada centro de acopio puede atender a toda la población, por lo que para este resultado fue muy importante la restricción de abrir mínimo 4 centros de acopio. La distribución de la demanda se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 3 Habilitación y asignación de centros de acopio - Problema base

Fuente: Elaboración propia

Centros de acopio habilitados	Asignación de comunas	Costo abrir un centro de acopio	% de la población afectada que es auxiliada por el centro de acopio habilitado
1	1	\$ 95.665.609	14,08%
	2		
	3		
12	4	\$ 110.220.313	41,96%
	5		
	7		
	8		
	9		
	12		
	13		
	14		
	11		
	15		
	16		
20	17	\$ 45.485.644	23,92%
	22		
	10		
	18		
	19		
	20		
21	6	\$ 110.473.534	20,04%
	21		

Se evidencia que el centro de acopio más importante es el de la comuna 12, este debe atender casi al 42% de la población afectada debido a su ubicación central, atiende directamente la demanda de 11 comunas. Por otro lado, los centros de acopio de la comuna 20 y 21 son más equilibrados, satisfacen la demanda del 44% de los damnificados a una proporción casi igual, de estos dos se destaca que la comuna 21 solo atiende a las personas de su comuna y de la 6, mientras que el centro de acopio de la 20 atiende a 6 comunas. Por último, se puede presumir que el centro de acopio más prescindible es el de la comuna 1 debido a que solo atiende a 3 comunas que representan el 14% de la demanda.

En este escenario, se encontró que el costo por la apertura de los centros de acopio representa el 93% de los costos totales de la operación, mientras que los costos por transporte y la gestión de mercancía solo ascienden a \$28.530.163, el 7% del costo total.

5.2.2 Conclusiones

Con la configuración que establecimos solo se abren los centros de acopio más baratos, esto se da porque los costos más significativos son los de apertura debido a que tienen una magnitud muy grande comparada con los costos de

desplazamiento, por esta razón, el modelo va a intentar abrir el mínimo número de centros de acopio disponibles sin importar todo lo que se tenga que desplazar la gente para llegar por ayuda humanitaria ni el desorden que implicaría atender toda la demanda en un número pequeño de centros de acopio . Por lo anterior, es casi imprescindible acotar el modelo con la restricción de apertura mínima o con una restricción de capacidad máxima. En este caso se realizó con las restricciones de apertura mínima de centros de acopio porque se buscó saber en qué lugares el modelo sugiere que debe haber una mayor capacidad.

En cuanto a los centros de acopio abiertos, podemos observar una tendencia marcada a abrir los centros de acopio en la zona superior de la ciudad de Cali, los centros de acopio de la comuna 12 y 21 se encuentran a tan solo 4 Km de distancia y aun así ambos se abren y atienden a más del 60% de los afectados. Esto nos da un indicio de las zonas donde deberían ubicarse los centros de acopio en la ciudad. Cabe destacar que esta solución está enfocada a los costos, sin embargo, a lo largo del trabajo hemos detectado que las zonas que más afectadas coinciden con las zonas donde es más barato abrir un centro de acopio por lo que estas soluciones pueden coincidir.

Por último, esta primera solución del modelo da una idea de en qué zonas deberían estar y que capacidad deberían tener los centros de acopio, pero para tener unos indicios más sólidos es necesario realizar diferentes experimentos que tengan en cuenta otros factores diferentes al netamente económico y encontrar patrones que permitan concluir de una mejor manera.

5.3 Objetivo 3: Evaluar las diferentes configuraciones que se obtienen al variar la capacidad de cobertura de la red logística

En el desarrollo de este objetivo se efectuaron cuatro diferentes variaciones en el modelo matemático, con el fin de evaluar y comparar las diferentes configuraciones de la red de logística humanitaria. A partir de esta información se realizaron mapas de cada uno de los escenarios, los cuales exponen la distribución y cobertura de los centros de distribución y centros de acopio que integran la red logística en cada uno de los escenarios.

Escenario 1

En el primer escenario se quitaron los costos de abrir los centros de acopio, con la intención de que la función objetivo optimizara la distancia de desplazamiento entre centros de distribución y centros de acopio. Con esta modificación en el modelo matemático, se obtuvo:

Tabla 4 Centros de distribución- Escenario 1

Fuente: Elaboración propia

Centros de Distribución	Abastece a los albergues:
1	9
2	4
3	12
4	21
	17

Tabla 5 Habilitación y asignación de centros de acopio - Escenario 1

Fuente: Elaboración propia

Albergues habilitados	Asignación de comunas	Costo abrir el albergue	% de la población afectada que es auxiliada por el albergue habilitado
4	2	\$ 271,001,664	14.35%
	4		
	5		
	7		
9	1	\$ 211,669,078	39.52%
	3		
	8		
	9		
	10		
	11		
	19		
	20		
12	12	\$ 110,220,313	12.86%
	13		
	14		
	15		
17	16	\$ 1,088,727,849	13.25%
	17		
	18		
	22		
21	6	\$ 110,473,534	20.04%
	21		

Una vez obtenida toda la información a partir de los resultados que arrojó Gams de la variación en la función objetivo en el modelo matemático, se elaboró el mapa que representa los centros de distribución que distribuyen las ayudas humanitarias a los centros de acopio habilitados y la cobertura de cada centro de acopio en función de las comunas asignadas.

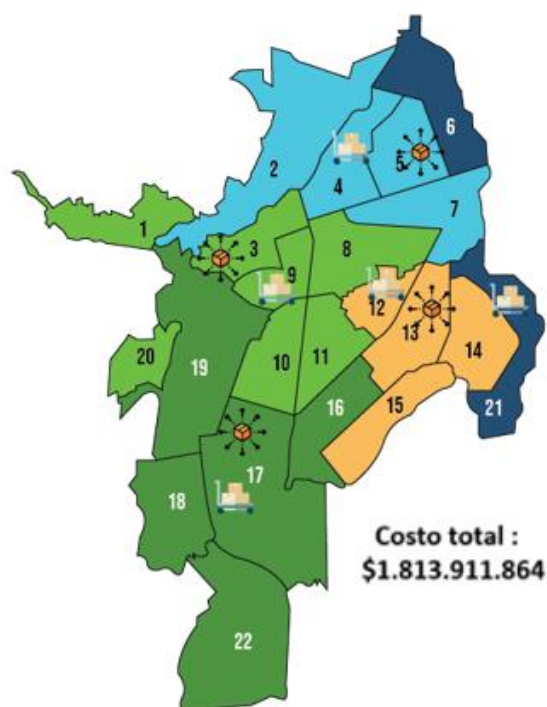


Ilustración 3 Mapa- Escenario 1

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar al eliminar de la función objetivo el costo de apertura, el objetivo del modelo se centra sólo en la minimización de distancias, lo que incrementa la cobertura y esto, a su vez, aumenta el dinamismo en la entrega de ayuda humanitaria.

El enfoque en la accesibilidad, al incrementar el número de centros de acopio y la distribución enfatizada en la minimización de distancias, se evidencia en primera medida porque se abrió el centro de acopio de la comuna 17 el cual geográficamente es el más cercano a las comunas 16,18 y 22. Sin embargo, se estima que este cubra al 13.25% de la población afectada, atendiendo a la comuna en la que está ubicado y a tres más y cuyo costo de habilitación representa el 60.02% del precio total de esta red logística; mientras que, el 39.98% del costo total está atendiendo al 86.75% de los damnificados. Además, es interesante como este centro de acopio cubre a tan solo un 0.39%, es decir 884 personas afectadas, más que el centro de acopio 12 (el más económico en esta configuración).

Por otro lado, se hizo evidente la importancia del centro de acopio ubicado en la comuna 9, ya que este cubrió al 39.52% de la población afectada, lo que representó

la atención a 8 comunas. Este auxilio generó un precio relativamente bajo en comparación a los costos más caros a la hora de habilitar los centros de acopio.

Finalmente, en este escenario el costo de la apertura de los centros de acopio representó el 98.797% de los costos totales; mientras que los costos por transporte equivalieron al 1.203% y el costo total de la configuración, en comparación a la configuración donde se optimizan costos ascendió de \$390.375.263 a \$1.813.911.864, el costo se elevó más del 450%.

Escenario 2

En el segundo escenario se disminuyó la restricción de la capacidad máxima de los centros de acopio a 45.000.

Tabla 6 Centros de Distribución- Escenario 2

Fuente: Elaboración propia

Centros de Distribución	Abastece a los albergues:
1	1
	20
3	12
	13
	15
	21

Tabla 7 Habilitación y asignación de centros de acopio - Escenario 2

Fuente: Elaboración propia

Albergues habilitados	Asignación de comunas	Costo abrir el albergue	% de la población afectada que es auxiliada por el albergue habilitado
1	1	95,665,609 \$	14.08%
	2		
	3		
12	4	110,220,313 \$	19.88%
	7		
	8		
	9		
	11		
	21		
13	5	151,963,734 \$	11.24%
	7		
	13		
	14		
15	11	112,963,674 \$	19.86%
	15		
	16		
	17		
	22		
20	10	45,485,644 \$	15.09%
	18		
	19		
	20		
21	6	110,473,534 \$	19.86%
	21		

Una vez obtenida toda la información a partir de los resultados que arrojó Gams, tras la variación que se le realizó al modelo matemático base, al aumentar la restricción de capacidad de los centros de acopio. Se elaboró el mapa respectivo a la configuración de logística humanitaria:

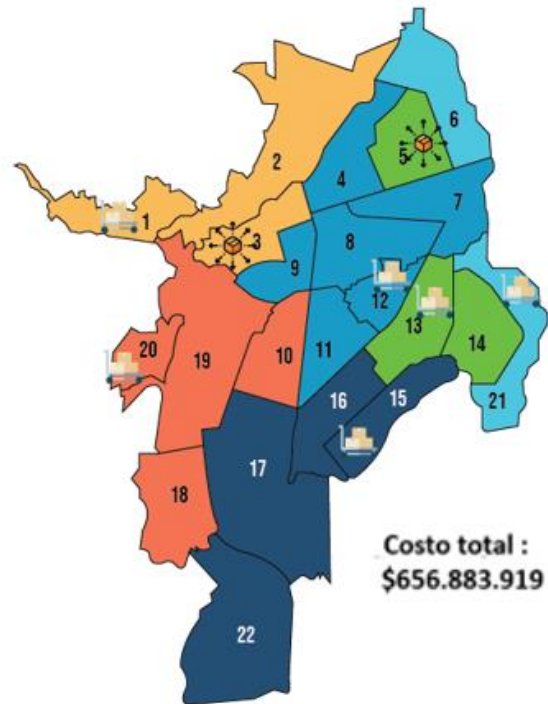


Ilustración 4 Mapa- Escenario 2

Fuente: Elaboración propia

Es importante indicar que los datos que están sombreados en la tabla 7 corresponden a las comunas que son abastecidas por dos diferentes centros de acopio, dado que estos últimos cumplieron con la restricción de capacidad máxima.

Esta configuración nos muestra un escenario cercano a la realidad, ya que cada uno de los centros de acopio va a tener un límite de capacidad, aquí se empieza a evidenciar como prioriza la atención a diferentes comunas y como a otras las divide y envía a las personas a diferentes centros de acopio. Además, en cuanto a costo se ubica en la mitad de los 2 escenarios anteriores.

Por otro lado, dada la restricción de capacidad de los centros de acopio, si una persona está ubicada en una determinada comuna cerca de un centro de acopio habilitado y este cumple con su capacidad máxima; de modo que la persona no

alcance a recibir su kit de ayuda, lo que genera que el individuo deba de desplazarse a otro centro de acopio. Un ejemplo de ello corresponde a una persona que se ubicaba en la comuna 21, en donde el centro de acopio está habilitado, pero llegó a su capacidad máxima, lo que genera que la persona deba desplazarse hacia el centro de acopio de la comuna 12 (que tiene la cantidad suficiente de kit para proporcionarle ayuda), es decir, que debe de recorrer 4.2 Km más y esto provoca una disminución en la velocidad de respuesta y logra que la persona reciba la ayuda requerida.

Finalmente, en este escenario el costo de la apertura de centros de acopio representó el 95.416% de los costos totales; mientras que los costos por transporte equivalieron al 4.484%.

Escenario 3

En el tercer escenario se buscó castigar en cuanto al costo el tener que desplazarse más de 8,5 Km para llegar al centro de acopio en donde se les suministrara la ayuda humanitaria. Con esta variación, el modelo arrojó los siguientes resultados:

Tabla 8 Centros de distribución- Escenario 3

Fuente: Elaboración propia

Centros de Distribución	Abastece a los albergues:
1	1
	20
2	12
4	18

Tabla 9 Habilitación y asignación de centros de acopio - Escenario 3

Fuente: Elaboración propia

Albergues habilitados	Asignación de comunas	Costo abrir el albergue	% de la población afectada que es auxiliada por el albergue habilitado
1	1	95,665,609 \$	14.08%
	2		
	3		
12	4	110,220,313 \$	62.01%
	5		
	6		
	7		
	8		
	9		
	11		
	12		
	13		
	14		
18	15	219,097,819 \$	11.64%
	16		
	21		
20	17	45,485,644 \$	12.28%
	18		
	22		
20	10	45,485,644 \$	12.28%
	19		
	20		

Con esta información se identificó la asignación de las comunas a los centros de acopio habilitados, la ubicación en función a las comunas de los centros de distribución y se procedió con la elaboración del mapa correspondiente a los nodos de la red logística.

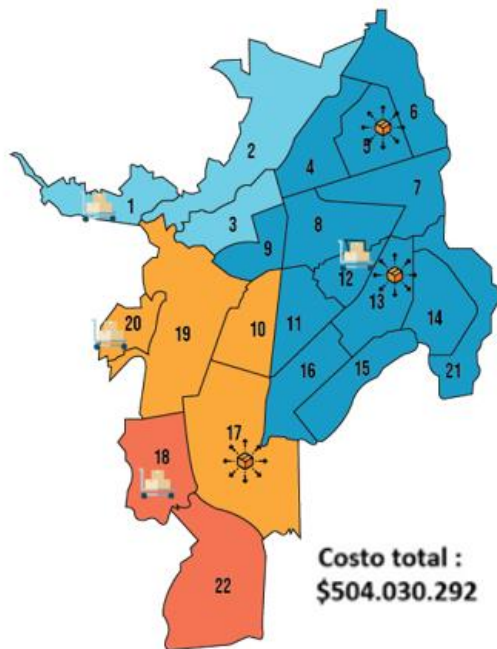


Ilustración 5 Mapa- Escenario 3

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados, se evidenció que el centro de acopio ubicado en la comuna 12 cubre al mayor porcentaje de la población afectada con el 62.01%, es decir, que atendió a 13 comunas y cuyo costo de apertura ocupa el tercer puesto entre las habilitaciones más económicas según la metodología determinante de los costos de apertura que se realizó en el presente estudio. Además, el costo de abrir el centro de acopio corresponde al 21.87% del costo total en esta configuración de logística humanitaria.

Además, pudimos analizar que el modelo tuvo muy en cuenta los altos costos que significan desplazar a una persona más de 8,5Km, ninguna de las personas en este escenario recorrió más de esta distancia para llegar al centro de acopio asignado.

También, se observó que el centro de acopio ubicado en la comuna 20 tiene el costo de habilitación más económico, y en este caso, auxilia al 12.28% de la población afectada. Lo anterior se considera como un aspecto positivo, teniendo en cuenta que, en esta configuración el centro de acopio 18 auxilia al 11.64% de la población damnificada y su costo de habilitación cuesta \$ 173.612.175 millones de pesos de más.

Finalmente, en este escenario el costo de la apertura de centros de acopio representó el 93.341% de los costos totales; mientras que los costos por transporte equivalieron al 6.659%.

Escenario 4

En el cuarto escenario se plantearon cuatro casos, modificando la función objetivo y cambiando la restricción de número de centros de acopio habilitados.

Tabla 10 Resumen de resultados- Escenario 4

Fuente: Elaboración propia

Escenario 4	Centros de Distribución	Albergues habilitados	% de la población afectada que es auxiliada por el albergue habilitado	Costo total
Habitando sólo un albergue				
4.1. Min. costos	1	20	100%	\$ 100,544,961
4.2. Min. distancias	1	9	100%	\$ 246,660,141
Habilitando solo dos albergues				
4.1. Min. costos	1	1	40.37%	\$ 191,602,156
		20	59.63%	
4.2. Min. distancias	1	9	67.80%	\$ 347,716,743
		21	32.20%	

4.1. Minimización de costos abriendo un solo centro de acopio Vs. Minimización de distancias abriendo un solo centro de acopio

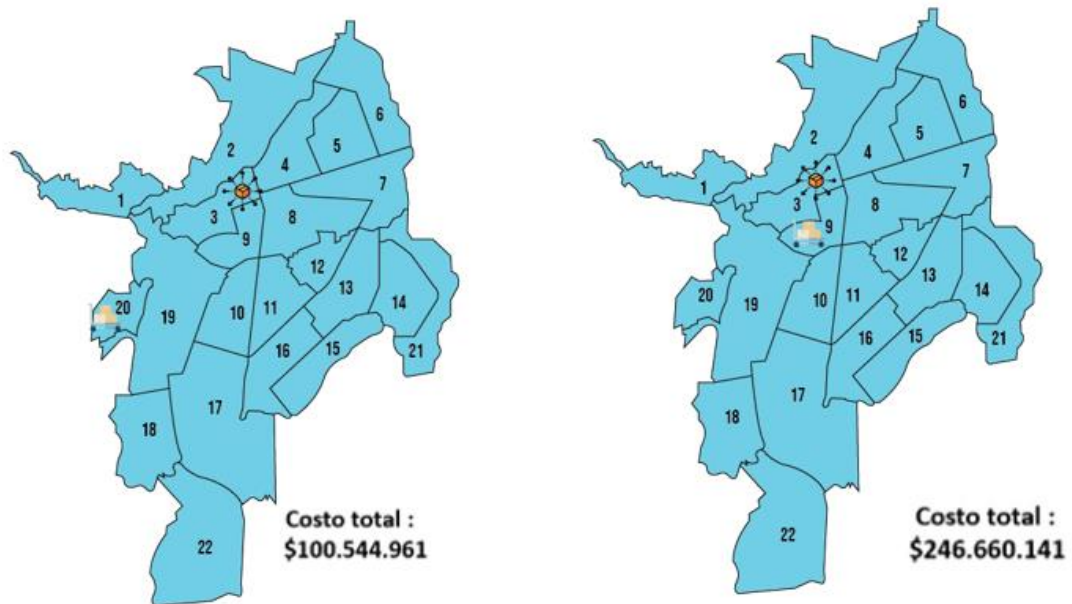


Ilustración 6 Mapas- Escenario 4.1 y 4.2

Fuente: Elaboración propia

4.2. Minimización de costos abriendo dos centros de acopio Vs. Minimización de distancias abriendo dos centros de acopio

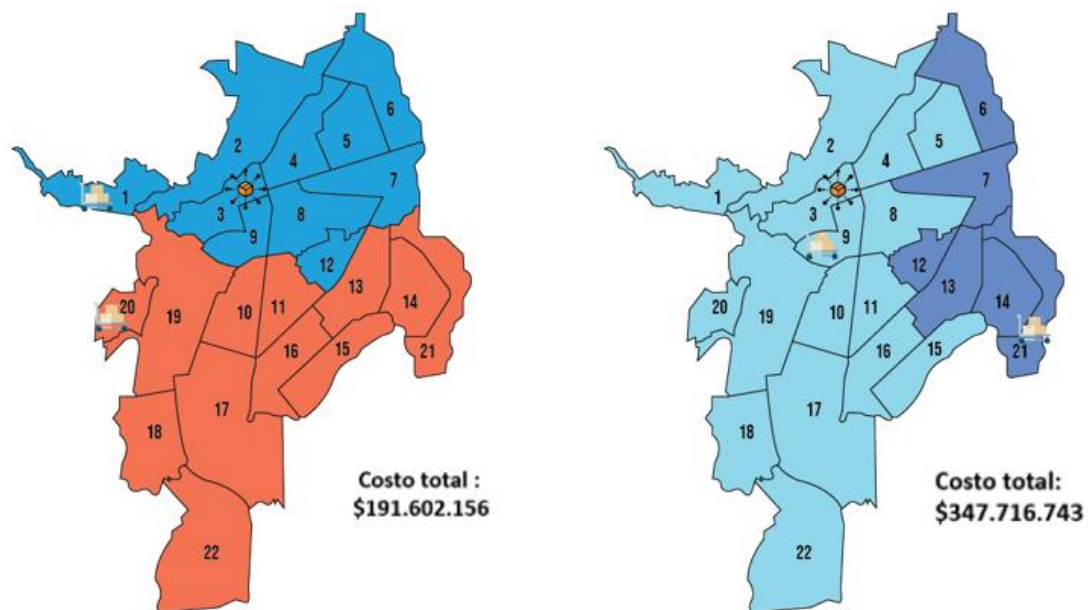


Ilustración 7 Mapas- Escenario 4.1 y 4.2

Fuente: Elaboración propia

Con estos experimentos se buscó tener una idea de cuáles son los centros de acopio claves que permiten minimizar ya sea costos o distancia recorrida, y por ende tiempo de respuesta, en este caso el centro de acopio 20 y 9 respectivamente, para poder tenerlos en consideración. En caso de que solo se pueda abrir 1 o 2 centros de acopio este experimento permite tener una idea de por dónde empezar.

Además, nos permiten observar el contraste de lo que debería de hacerse desde la perspectiva de los costos, contra lo que debería de hacerse. Lo anterior, con el fin de configurar una respuesta más ágil ante una determinada situación de emergencia; además, permite reflexionar sobre el cómo cambia totalmente el panorama de las redes logísticas, en función al enfoque deseado.

5.3.1 Conclusiones:

A partir de las diferentes configuraciones de la red de logística humanitaria se obtuvieron los costos totales respectivos a cada variación realizada en el modelo matemático:

Tabla 11 Resumen de resultados- Costos Totales

Fuente: Elaboración propia

Escenario	Costo total	% del CT destinado a la apertura de los albergues	% de CT destinado al transporte
1	1,813,911,864 \$	98.80%	1.20%
2	656,883,919 \$	95.42%	4.48%
3	504,030,292 \$	93.34%	6.66%
4.1	100,544,961 \$	45.239%	54.761%
4.2	246,660,141 \$	85.81%	14.19%
4.3	191,602,156 \$	73.67%	26.33%
4.4	347,716,743 \$	92.65%	7.35%

Con los costos totales en las redes de logística humanitaria 1, 2 y 3, se determinó cual fue el costo promedio requerido para lograr atender a las 22 comunas de la ciudad de Cali. Tras esto y gracias a la identificación del centro de acopio con mayor cobertura y al número de comunas atendidas por este, se procedió a multiplicar dicho valor por el número de comunas atendidas por el centro de acopio de máxima cobertura, con lo que se obtuvo la porción del costo total de la red asignado a ese

centro de acopio con el propósito de que pueda prestar los servicios requeridos y suplir la demanda.

Con lo anterior, se llegó a que el costo total del centro de acopio de máxima cobertura en el escenario 1 representó el 36.36% del costo total de la red de logística humanitaria. En cuanto al escenario 2, el centro de acopio de mayor cobertura fue el 12, cuyo costo equivale al 31.82% de la configuración logística. Finalmente, en el escenario 3 el centro de acopio de mayor cobertura fue el 12 y su costo figura con el 59.09% del costo total de la red humanitaria.

En los tres primeros escenarios la diferencia en el costo de transporte no difirió mucho en comparación con el escenario 4.1 que priorizó la minimización de costos habilitando un solo centro de acopio. En este caso se observa que los costos de transporte representan más de la mitad del costo asignado a la apertura del centro de acopio.

Además, gracias a la tabla que resume los costos totales, se identificó que el 85.71% de los escenarios propuestos el porcentaje del costo total destinado a la apertura de los centros de acopio fue mayor al 73%; mientras que, el porcentaje asignado a costos de transporte fue inferior a 27%.

Con estos experimentos no se busca decidir cuál es el mejor escenario y más acorde para la ciudad, sino por el contrario mostrar las diferentes consideraciones que se pueden tener y como estas afectan sustancialmente a la configuración adecuada que arroja el modelo. Lejos de llegar a decantarse por una de estas configuraciones lo ideal es realizar experimentos que combinen factores cualitativos y cuantitativos y que permitan llegar a un punto medio entre el costo del proyecto, la velocidad de respuesta y la comodidad de los usuarios porque no está de más recordar que estamos hablando de vidas humanas.

Por último, se realizaron dos tablas que presentan la frecuencia en la que se habilitaron los centros de acopio en los ocho escenarios que se plantearon en el presente proyecto:

Tabla 12 Frecuencia de centros de acopio habilitados en los escenarios planteados

Centro de acopio	Escenario								Total escn.	8
	Base	1	2	3	4.1	4.2	4.3	4.4	Frecuencia	Porcentaje
1	x		x	x			x		4	50.0%
2									0	0.0%
3									0	0.0%
4		x							1	12.5%
5									0	0.0%
6									0	0.0%
7									0	0.0%
8									0	0.0%
9		x				x		x	3	37.5%
10									0	0.0%
11									0	0.0%
12	x	x	x	x					4	50.0%
13			x						1	12.5%
14									0	0.0%
15			x						1	12.5%
16									0	0.0%
17		x							1	12.5%
18				x					1	12.5%
19									0	0.0%
20	x		x	x	x		x		5	62.5%
21	x	x	x					x	4	50.0%
22									0	0.0%

A partir de esta información se concluyó que el centro de acopio ubicado en la comuna 20 se habilitó el 62,5% de las veces, con lo que se considera que es un punto óptimo y estratégico por la sinergia entre su nivel de cobertura y su costo. Al igual que los centros de acopio ubicados en las comunas 12, 21 y 1 que se habilitaron en el 50% de los escenarios. Por otro lado, se evidenció que los centros de acopio ubicados en las comunas: 2,3,5,6,7,8,10,11,14,16,19 y 22 no se habilitaron en ninguno de los escenarios, ya sea por su baja cobertura o los altos costo que representan su habilitación.

Esto genera un primer paso para la elaboración o inclusión de esta información en los planes de contingencia, ya en esta se evidenciaron comunas cuya ubicación es estratégica a la hora de suministrar ayudas humanitarias en caso de que ocurra un terremoto en la ciudad de Cali; e incluso estos hallazgos representan un nuevo factor de investigación y desarrollo para futuras investigaciones.

Tabla 13 Iteración de centros de acopio

Centro de acopio	Minimizar costos				Minimizar distancia			
	Base	2	4,1 - 4,3	Total	1	3	4,2 - 4,4	Total
<u>1</u>	<u>x</u>	<u>x</u>	<u>x</u>	<u>100%</u>		x		33%
2				0%				0%
3				0%				0%
4				0%	x			33%
5				0%				0%
6				0%				0%
7				0%				0%
8				0%				0%
<u>9</u>				0%	<u>x</u>	<u>x</u>	<u>x</u>	<u>100%</u>
10				0%				0%
11				0%				0%
12	x	x		67%	x	x		67%
13		x		33%				0%
14				0%				0%
15		x		33%				0%
16				0%				0%
17				0%	x			33%
18				0%		x		33%
19				0%				0%
<u>20</u>	<u>x</u>	<u>x</u>	<u>x</u>	<u>100%</u>		x		33%
21	x	x		67%	x		x	67%
22				0%				0%

Finalmente, se hace fundamental resaltar que el espíritu del modelamiento matemático realizado fue estudiar cómo cambian las diferentes soluciones optimas frente a diferentes escenarios y bajo diferentes criterios. Con el objeto de identificar resultados que se presenten de manera iterativa a lo largo de las diferentes soluciones a los experimentos realizados, como se evidencia en la tabla 13, en la cual se observa la relevancia del centro de acopio 12 o 21 desde la perspectiva de costos y distancias. Esto resulta muy interesante, ya que esas iteraciones son hallazgos realmente valiosos y relevantes, pues este análisis sugiere comunas estrategias que puedan contribuir a generar una respuesta mucho más eficiente y efectiva ante un evento catastrófico.

6. Conclusiones generales:

Dado que en la bibliografía revisada no se encontraron estudios similares para Colombia, que implementaran los problemas FLC y SCP en cuestiones de logística humanitaria, este trabajo representa una aproximación en la implementación de las herramientas que ofrece la investigación de operaciones en la realización de planes de contingencia.

En este contexto las bases de datos que fueron empleadas en la configuración de las entradas, para la programación del modelo matemático, fueron fundamentales para el desarrollo en el presente estudio. Cabe resaltar la importancia del proyecto *Estimación de los impactos sociales y económicos de un terremoto usando regresión lineal múltiple* (Quinceno & Villegas, 2018), ya que suministraron datos actualizados y confiables que fueron determinantes a la hora de calcular los costos de apertura de centros de acopio, lo que en cierta medida permitió la continuación de dicho estudio, al dar un paso hacia la determinación de la ubicación de centros de acopio de ayudas humanitarias. Además, se debe recalcar la organización y asequibilidad de las estadísticas y cifras de la ciudad Santiago de Cali en la página web de la alcaldía municipal y la información sobre la estandarización de ayudas en caso de emergencias para el país.

En cuanto al proyecto, se obtuvo un modelo matemático que abarca una amplia cantidad de consideraciones, fácil de entender, de editar y de replicar; ya que uno de los objetivos se direcciona a que este estudio sirva como herramienta para futuras investigaciones que profundicen, añadan y experimenten en diferentes contextos. Además, en la fase de experimentación se evidenció la alta gama de posibilidades a las que se puede llegar; sin embargo, las diferentes alternativas generan un dilema ético debido a que se deben de realizar priorizaciones en el modelo, lo que conlleva a cuestionarse ¿Es más importante minimizar los costos del proyecto o es más importante tener una estructura sólida que priorice el bienestar de los posibles afectados aunque cuesta 4 o 5 veces más?, ¿Qué pasa si se hace una inversión enorme y nunca sucede un terremoto?, pero ¿Qué pasa si sucede un terremoto y no tenemos la estructura necesaria para sopórtalo? ¿Cuándo vale la vida de una persona?

7. Limitaciones y Recomendaciones¹

- Las limitaciones del presente trabajo se centraron en el gran número de variables que propusimos implementar. En el caso de GAMS, el programa, en su versión gratuita tiene un número máximo de variables que se pueden implementar, número que excedimos casi de inmediato, lo cual dificultó significativamente la programación del modelo. De esta manera, se recomienda para futuros trabajos implementar este modelo en un ambiente de programación de que permita ejecutar sin inconvenientes una amplia cantidad de variables.
- La metodología que se empleó en el presente estudio puede ser empleada y reproducida como herramienta que contribuya a cualquier plan de contingencia, no solo para los terremotos.
- Este proyecto de investigación puede ser replicable en diferentes contextos cambiando los parámetros necesarios para poder adaptarse. Además, puede ser utilizado como base para poder desarrollar modelos más complejos y detallados.
- Este modelo se plantea como una base sobre la cual se pueda realizar futuros proyectos de investigación como una herramienta ideal para la experimentación de diversos escenarios que no se tuvieron en cuenta.
- Dado que la versión de GAMS que se empleó fue la gratuita, esta tiene una limitante en el número de variables que se puede implementar, se recomienda emplear la página web: <https://neos-server.org/neos/cgi-bin/nph-neos-solver.cgi> para darle solución al modelo matemático que contengan matrices que superen el número de variables permitidas.
- Para futuros estudios se plantea realizar un plan basado en supply chain con el fin de estimar de manera oportuna la ayuda requerida para un mes o más de emergencia, causada por una catástrofe natural.

¹ Proyecto de grado II comprende el desarrollo completo del proyecto de investigación. Se espera que el documento no exceda 50 páginas (Tamaño de fuente 12, interlineado 1.5).

8. BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía de Cali. (2017). Cali en cifras 2016. Retrieved from <http://www.cali.gov.co/planeacion/publicaciones/138164/cali-en-cifras/>
- Altay, N., & Green, W. G. (2006). OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 175(1), 475–493. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.05.016>
- Anaya-Arenas, A. M., Renaud, J., & Ruiz, A. (2014). Relief distribution networks: a systematic review. *Annals of Operations Research*, 223(1), 53–79. <https://doi.org/10.1007/s10479-014-1581-y>
- Benavente, R. (2018). Resumen. *PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ*.
- Bieniek, M. (2015). A note on the facility location problem with stochastic demands. *Omega (United Kingdom)*, 55(September 2015), 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.02.006>
- Blanco, E.-J., & Sanz, H. (2016). Algoritmos de clustering y aprendizaje automático aplicados a Twitter, 56. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/82434/113257.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Duarte, A. E. (2015). Metodología para la localización de instalaciones de producción de biocombustibles con enfoque de cadenas de suministro. Aplicaciones en el contexto colombiano, 194. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/50822/>
- Galindo, G., & Batta, R. (2013). Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 230(2), 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.039>
- Haddow, G. D., Bullock, J. A., & Coppola, D. P. (2003). *Introduction to Emergency Management*. *Introduction to Emergency Management*. <https://doi.org/10.1111/1540-6210.00244>
- Hillier, F., & Liberman, G. J. (n.d.). *Introducción a la investigación de operaciones* (9na ed.). México: Mc Graw Hill.
- Iniestra, J. G., Arroyo López, P. E., & Enríquez Colón, R. (2012). Un Modelo Bi-Criterio Para La Ubicación De Albergues , Como Parte De Un Plan De Evacuación a Bi-Criteria Model To Locate Shelters As Part of an. *Revista Ingeniería Industrial*, 11(2), 35–56.
- Lavell, A. (2001). Sobre la gestión del riesgo: apuntes hacia una definición. *Scripta*

Nova–Revista, 1–23.

Manjarrés, J., Uribe, C., Millán, M., & Stapper, C. (2006). Boletín Estadístico CRA. Retrieved from <http://www.cra.gov.co/documents/boletin1.pdf>

Quinceno, Y., & Villegas, J. S. (2018). Estimación de los impactos sociales y económicos de un terremoto usando regresión lineal múltiple. Cali: 2018.

Reyes-rubiano, L. S., Quintero-araújo, C. L., & Torres-ramos, A. F. (2014). Modelo Matemático para la Programación de Personal Especializado en Logística Humanitaria- Post-Desastre. *Laccei 2014*, (JANUARY), 1–7.

Riesgo, D. G. (n.d.). Ley Sistema Nacional.

UNGRD. (2013). *Estandarización de Ayuda Humanitaria de Colombia*.


UNGRD. (2017). *Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes*. Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo SNGRD. Retrieved from <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20761/Terminologia-GRD-2017.pdf;jsessionid=1ADDEE38CA0713C6B15CC4D150169677?sequence=2>

Wolsey, L (1988). *Integer Programming*. New York, Estados Unidos: Wiley-Interscience; Edición: 1

9. ANEXOS

Anexo 1. Constancia de revisión

RE: AVANCE PDG CARDENAS-MANRIQUE

 Rolando Jose Acosta Amado <rjacosta@icesi.edu.co>
Jue 11/10/2018, 4:27 PM
Usted; María Angelica Cardenas Muñoz ↕

Hola,

Luego de revisar el informe que me presenta Sebastián; que tiene una modificación con respecto al que me enviaron primero en el email de María Angélica, me parece que está ok; solo deben hacer las modificaciones puntuales a la metodología. Borrar el título de análisis y recolección de datos, y contextualizar lo que se debe hacer para cumplir el objetivo dos y tres dentro de los pasos de un proyecto de investigación de operaciones como los presenta el libro de Lieberman; que obviamente deben citar en ese aparte del trabajo.

Quedo entonces atento a las inquietudes y a que sigamos avanzando en el tema.

Gracias,

Rolando

Anexo 2. Reporte de Cambios y Ajustes

Con base en la rúbrica y comentarios del Lector y considerando los comentarios incluidos en el acta de sustentación los estudiantes deben realizar el Reporte de Cambios y Ajustes. Este documento es uno de los elementos de la entrega final y debe acompañar la versión final del proyecto de grado.

Título del Proyecto:

MODELO MATEMÁTICO PARA EL DISEÑO DE REDES DE LOGÍSTICA HUMANITARIA EN LA CIUDAD DE CALI

Integrantes:

Juan Sebastián Manrique Fernández
María Angélica Cárdenas Muñoz

Lector: Fernando Quintero Moreno

No.	Comentarios Lector/sustentación	Respuesta/Modificación (incluir la página del documento)
1	Comentarios a lo largo del word	Se hicieron las modificaciones correspondientes
2	Diferencias de términos entre centros de acopio, albergues y almacenes	Se aclaró en el primer objetivo que en este trabajo nos referimos a centros de acopio de ayuda humanitaria y que los trabajos referenciados y analizados (en el obj 1), son los que hablaban sobre los otros términos, por el direccionamiento de los trabajos.
3	Correcciones en la formulación escrita en el word	Dado que en el modelo en GAMS si se había realizado adecuadamente, pero se había cometido un error al pasarlo a la fórmula escrita, se corrigió en el 2do objetivo.
4	Las conclusiones deben mejorarse	Una buena conclusión fue agregada junto a su tabla explicativa (Tabla 13).

Nota: para la entrega final se debe anexar esta carta escaneada con la firma del tutor temático.

