PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

MARCO CONCEPTUAL SOBRE LOGÍSTICA HUMANITARIA

Trabajo de investigación para la obtención del grado de BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERIA INDUSTRIAL

AUTOR

GUSTAVO ANDRES URIBE PATIÑO

ASESOR:

CHRISTIAN CORNEJO SANCHEZ

Lima, julio, 2021

RESUMEN

Esta investigación tiene como finalidad resaltar la importancia de la logística humanitaria y los modelos matemáticos aplicados a esta. Por ello, se realiza una revisión de la literatura sobre la logística humanitaria que empieza discutiendo la diferencia entre fenómeno y desastre natural para resaltar que no todo fenómeno natural necesariamente desencadena un desastre, ya que existen otros factores como la vulnerabilidad de los sistemas socioeconómicos y la exposición del sistema que deben ser tomados en cuenta para que un desastre ocurra. Asimismo, se efectúa una comparación entre la logística humanitaria y su contraparte comercial para identificar las principales diferencias en sus objetivos y clientes principales. Posteriormente, se estudian aspectos relacionados con la investigación de la logística humanitaria en los que se analizan los principales retos, dificultades e indicadores de desempeño. Se realiza un análisis y explicación de los modelos matemáticos aplicados a este ámbito y se encuentra que algunos de estos toman como base al modelo de la máxima cobertura propuesto por Church y ReVelle (1974); sin embargo, teniendo en cuenta que la finalidad de la logística humanitaria es salvar vidas, se concluye que para que el modelo sea realmente efectivo se debe ajustar su función objetivo a una que maximice la cantidad de personas atendidas incluyendo restricciones que tomen en cuenta aspectos como la distancia entre puntos, disponibilidad de recursos, peso o volumen de los recursos, presupuesto asignado o cantidad y tipo de vehículos disponibles.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Fenómeno y desastre natural

Romero y Maskrey (1993) establecen que un fenómeno natural es cualquier evento natural que ocurre por a su propio funcionamiento interno que puede aparecer de forma regular o de forma súbita; sin embargo, un fenómeno natural no es necesariamente un desastre natural, pues los fenómenos deben ser entendidos como elementos activos de la geomorfología terrestre.

Según la United Nations Inter-Agency Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction ([UNISDR], 2009, p. 9), un desastre es definido como "una disrupción del funcionamiento de una comunidad o sociedad en cualquier escala debido a las amenazas que interactúan con las condiciones de exposición, vulnerabilidad y capacidad que llevan a los siguientes eventos: pérdidas humanas, materiales, económicas e impactos ambientales". Asimismo. la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR, 2020), afirma que:

> Los desastres son el resultado de una amenaza natural o antropogénica que repercute en un asentamiento humano, el cual no cuenta con los recursos adecuados o no está organizado de forma tal que pueda resistir su impacto, y cuya población es vulnerable debido a la pobreza, la exclusión o por ser socialmente desfavorecida de alguna u otra forma. (párr. 3)

Como complemento de las definiciones previas, Romero y Maskrey (1993), indican que un desastre natural es "la correlación entre fenómenos naturales peligrosos y determinadas condiciones socioeconómicas y físicas vulnerables". Por ello, se entiende que un fenómeno natural es considerado desastre natural cuando la zona afectada es vulnerable y sus condiciones socioeconómicas no son las adecuadas. Teniendo esto en cuenta, los desastres naturales pueden ser clasificados de distintas formas. Una de ellas es la que señala el Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED, s.f.) y se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1

Clasificación de desastres naturales

Clasificación	Definición	Desastres
Geofísico	Eventos que se origina en la tierra sólida	Terremotos Actividad Volcánica
Meteorológico	Eventos originados por procesos meteorológicos que son corta duración	Temperaturas extremas Niebla Tormentas
Hidrológico	Eventos causados por el movimiento y distribución de agua dulce y salada, superficial y subterránea	Inundaciones
Climatológico	Eventos originados por procesos atmosféricos de larga duración que pueden ser de variabilidad intraestacional a multidecenal	Sequías Descongelamiento de glaciares Incendios forestales
Biológico	Eventos causados por la exposición de organismos vivos, sustancias tóxicas o enfermedades que pueden ser transmitiditas a través de vectores	Epidemias Plagas

Fuente: CRED (s.f)

1.2. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad es un término que puede ser entendido de distintas maneras. En primer lugar, de acuerdo con la United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR, 2007), el termino vulnerabilidad se refiere a “condiciones determinadas por factores físicos, sociales, económicos y ambientales o por procesos que aumentan la susceptibilidad de una comunidad a ser afectadas por un peligro”. Otra definición es brindada por Wilches-Chaux (1993), el cual indica que la vulnerabilidad es la incapacidad de una comunidad o sociedad de poder adaptarse de manera adecuada a los cambios repentinos en su entorno. En este sentido, una situación vulnerable es aquella en la que una población está expuesta a sufrir daños en caso ocurra algún fenómeno natural peligroso. En el caso de las poblaciones, Romero y Maskrey (1993) nos dicen que existen tres razones principales para que una población sea vulnerable: la utilización de terrenos no aptos para construcción de viviendas, las precarias condiciones de las viviendas debido al material inadecuado empleado para su construcción y las pobres condiciones económicas de la localidad, que también es considerada como una situación de vulnerabilidad. Por ello, se puede entender que la vulnerabilidad de las poblaciones se debe en parte a al accionar del mismo hombre, pues, para el caso de la construcción de viviendas, las decisiones tomadas por este deben considerar la posibilidad de que un fenómeno natural puede ocurrir (Romero & Maskrey, 1993, p. 9). Asimismo, el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI, 2006) señala que "la vulnerabilidad de un centro poblado es el reflejo del estado individual y colectivo de sus elementos o tipos de orden ambiental y ecológico, físico, económico, social, y científico y tecnológico".

1.3. Logística humanitaria

En esta sección, se presentará una revisión a la literatura sobre logística humanitaria.

1.3.1. La cadena de suministros

Existen distintas maneras de definir a la cadena de suministros comercial; sin embargo, luego de analizar 173 definiciones distintas, Stock y Boyer (2009) llegan a un consenso y la definen como:

> Una red de relaciones dentro de una empresa y entre organizaciones interdependientes y unidades de negocio formadas por proveedores, compras, producción, instalaciones, logística, marketing y sistemas relacionados que facilitan el avance y retroceso del flujo de productos, servicios, finanzas e información desde el productor original hasta el cliente final con los beneficios de agregar valor, maximizar la rentabilidad a través de eficiencias y lograr la satisfacción del cliente. (p. 706)

Entonces, de la definición anterior se puede notar que la cadena de suministros, en el ámbito comercial, se lleva a cabo por empresas u otras entidades y centra sus actividades en una red de distribución de productos o servicios que va desde los proveedores hasta el consumidor final. Asimismo, la cadena de suministros comercial tiene como finalidad generar la mayor rentabilidad para la empresa sin descuidar las necesidades del cliente final. Además, se debe resaltar que para que la cadena de suministros funcione correctamente se debe tener un alto grado de coordinación con todas las partes involucradas. También es fundamental mantener una buena relación con los proveedores pues son ellos los encargados de brindar la materia prima a la empresa para que esta pueda operar sin problemas mayores.

En contraste con el ámbito comercial, en la logística humanitaria la cadena de suministros se adapta a las situaciones generadas por los desastres naturales, por ejemplo "las pérdidas directas e indirectas sufridas por las personas damnificadas, cuyas pérdidas, por ejemplo, de sus bienes, significan muchas veces el resultado del esfuerzo de generaciones" (Zeballos, 2008, p. 230). Por ello, los bienes o servicios que se repartirán a lo largo de esta red deben satisfacer las necesidades de las personas afectadas lo más rápido posible (Viera, Moscatelli y Mercader, 2012). Asimismo, Beamon y Balcik (2008) resaltan las siguientes diferencias entre una cadena de suministros comercial y una humanitaria, y se muestran en la tabla 1.2.

1.3.2. Desempeño

Según Beamon y Balcik (2008), para poder medir que tan bien resulta el desempeño de la cadena de distribución en la logística humanitaria se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- ***Costos***

En toda cadena de suministros la medición de costos resulta ser un aspecto relevante. En particular, en la evaluación del desempeño de la logística humanitaria se debe prestar especial atención a los costos de los recursos que fluyen a través la cadena suministro, porque luego un desastre estos tienden a subir. Lo mismo ocurre con los costos de distribución, ya que, debido a la naturaleza de un desastre, es más difícil hacer llegar los recursos a los damnificados. Finalmente, los costos de mantener inventario también aumentan pues el cambio repentino en la cantidad de demanda, la diversidad en los recursos y en el lead time hacen que sea más difícil de controlar (Beamon & Balcik, 2008, p. 16).

Tabla 1.2

Diferencias entre tipos de cadenas de suministros

Tipo de Organización	Cadena de suministros comercial	Cadena de suministros humanitaria
	Con fines de lucro	Sin fines de lucro (ONG)
Objetivos principales	Reducción de costos Reducción de capital Mejora del servicio	Salvar vidas teniendo en cuenta las restricciones económicas
Características de la demanda	Productos o servicios Demanda estable *Lead time* de días o semanas Precios relativamente estables	Suministros para damnificados Demanda dependiente del tipo de desastre Sin *lead time* Precio que aumentan drásticamente
Características del cliente	Oportunidad de elegir el tipo de producto que desea	Acepta suministros que se tiene a disposición

Fuente: Beamon y Balcik (2008)

- **Parámetros de salida**

Los parámetros de salida se refieren a aquellos que miden las características y efectividad del suministro. En este sentido, los parámetros que se toman en cuenta para la medición del desempeño son el tiempo de respuesta, pues después un desastre el tiempo en el que los recursos llegan a los afectados es crucial, y el número de suministros disponibles, ya que la cantidad de los productos necesitados varía dependiendo del tipo y magnitud del desastre. (Beamon & Balcik, 2008, p. 17)

- **Parámetros de flexibilidad**

En este caso, los parámetros medidos para calificar la cadena de suministros son la capacidad de responder ante cualquier magnitud de un desastre, que hace referencia a la cantidad de productos y al tiempo en el que distintas organizaciones pueden ayudar a los afectados dependiendo de la severidad del desastre, y la capacidad de proveer diversidad de recursos, pues la necesidad y los tipos de estos varían según el desastre ocurrido. (Beamon & Balcik, 2008, p. 19)

1.3.3. Dificultades

Kovács y Spens (2009) indican que las dificultades en las operaciones de la logística humanitaria giran en torno al tipo de desastre ocurrido, la fase de alivio en la que se encuentran y las diferentes organizaciones involucradas. Estas tres dificultades pueden relacionarse de manera directa, debido a que, dependiendo del tipo de desastre ocurrido, los impactos generados en las diferentes regiones son distintos, ya que su geografía, demografía y estatus socioeconómico son factores que determinan la gravedad del impacto. Por ello, las fases del alivio del desastre, que pueden ser la "preparación", "respuesta inmediata" y "recuperación", tienen una duración proporcional a la severidad del desastre natural ocurrido, pues cuanto más elevados sean los daños o consecuencias causados por estos, más tiempo le tomará a la población recuperarse. En este sentido, se requiere de muchas organizaciones que puedan ayudar en las distintas fases del alivio del desastre. Estas pueden ser de distintos tipos como por ejemplo ONGs, gobiernos o agencias supranacionales. Estas organizaciones cumplen roles distintos pues poseen distintas funciones dependiendo de los bienes que reparten, los servicios que brindan, el público al que se dirigen y el tipo de desastre en el que actúan. Asimismo, Daud et al. (2016) afirman que otras dificultades comunes en las operaciones de la logística humanitaria resultan ser la entrega de los suministros adecuados de comida en buenas condiciones, la coordinación y priorización del uso del transporte y el almacenamiento y el transporte de los suministros,

En el ámbito de la investigación sobre logística humanitaria Kunz et al. (2016) indican que hay barreras que impiden su estudio. La primera de ellas sería la falta de contextualización pues debido a lo impredecible que suelen ser los desastres, la logística humanitaria suele actuar bajo un escenario de mucha incertidumbre. Por ello, es difícil elaborar un plan de distribución de bienes de ayuda pues puede darse el caso de que el desastre sea de gran magnitud e impida el uso de las rutas establecidas para el reparto. Asimismo, se debe tener en cuenta la situación política de la zona afectada, pues puede ocurrir que el gobierno de esa zona imponga barreras para la ayuda humanitaria. Por otro lado, el acceso a las investigaciones realizadas sobre la logística humanitaria es limitado y requieren de un pago para poder acceder a ellas. Sin embargo, las organizaciones humanitarias no cuentan con la posibilidad de hacer esto, lo cual limita el desarrollo su investigación. Otro problema que puede surgir en la investigación es la difícil recolección de datos, pues esta resulta ser una tarea difícil en la logística humanitaria debido a lo impredecible que puede ser un desastre. Usualmente, la información con la que se cuenta es recolectada con el fin de documentar los sucesos y las estimaciones de los impactos muestran limitaciones. Por ello, los modelos desarrollados se resuelven con base a datos hipotéticos y es por eso que los resultados obtenidos pueden llegar a ser irrelevantes.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Modelos de localización de almacenes para artículos de ayuda humanitaria

Debido a que el objetivo principal de la logística humanitaria es proveer la ayuda necesaria a las áreas afectadas de la manera más rápida y efectiva posible, el diseño y operación de una cadena de suministros humanitaria se hace necesaria (Balcik y Beamon, 2008). Por ello, según Church y ReVelle (1974), un modelo que suele ser muy útil en este tipo de casos es el problema de la máxima cobertura.

2.1.1. Problema de la máxima cobertura.

El problema de la máxima cobertura tiene como finalidad maximizar la cantidad de población atendida a través de la localización de centros de distribución, teniendo en cuenta que la distancia tomada entre punto demandante y centro de distribución debe ser la menor posible (Church y ReVelle, 1974). Para este modelo los índices a utilizar son i y j, los conjuntos a utilizar son I y J, donde I contiene a todos los puntos de demanda y J contiene a todos los posibles puntos de localización de almacenes. A continuación, se detallan los parámetros utilizados.

Parámetros

S: distancia máxima para que un punto de demanda sea considerado como no satisfecho

d_{ij}: distancia más corta entre el nodo i y el nodo j, donde $i \in I$ y $j \in J$

N_i: cantidad de almacenes que pueden atender el punto de demanda j donde $j \in J$ y $d_{ij} \leq S$

α_i: población a ser atendida en el punto de demanda i

P: cantidad de almacenes a ser localizados

Variables de decisión

Las variables binarias a encontrar son:

x_j: 1 si el centro de distribución es asignado al lugar j, caso contrario toma el valor 0

y_i: 1 si la población i será atendida, caso contrario toma el valor 0

El modelo es el siguiente:

$$\max \sum_{i \in J} a_i y_i \qquad (1)$$

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i \quad \text{para todo } i \in I \qquad (2)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P \qquad (3)$$

$$x_j = (0,1) \quad \text{para todo } j \in J \qquad (4)$$

$$y_i = (0,1) \quad \text{para todo } i \in I \qquad (5)$$

La función objetivo (1) tiene como finalidad maximizar la población atendida por los centros de distribución. La restricción (2) indica que, si la población y es atendida en el nodo de demanda i, entonces uno o más almacenes son localizados en el punto de oferta j. La restricción (3) tiene como finalidad determinar la cantidad total de centros de distribución (P). La restricción (4) indica la condición binaria de la variable x. Finalmente, la restricción (5) indica la condición binaria de la variable y.

Church y ReVelle (1974) indican que para la resolución de este modelo se pueden emplear aproximaciones heurísticas. En este caso, plantean que el algoritmo heurístico a emplear consiste en elegir primero el centro de distribución que satisfaga la mayor cantidad de personas posible, luego se elegirá un centro de distribución que satisfaga la demanda insatisfecha del primer centro y se continuaría así hasta cubrir toda la demanda posible. De esta manera, se puede llegar a tener una solución rápida; sin embargo, al aplicarse un algoritmo heurístico no se asegura que la solución sea la óptima. Asimismo, se puede llegar a obtener una solución óptima empleando la programación lineal, en la que, si los valores obtenidos para la variable x cumplen con la condición binaria impuesta, entonces la solución será correcta. Por otro lado, si se obtienen soluciones distintas a los valores binarios entonces se tendrá que optar por una programación lineal que obtenga soluciones fraccionarias.

En contraste al modelo anterior, Karasakal y Karasakal (2004) discrepan con la idea de que solo se deben atender aquellos puntos de demanda que puedan ser satisfechos completamente y que sería más efectivo desarrollar un modelo en el que se permita satisfacer puntos parcial y completamente y así se lograría auxiliar a más personas luego de un desastre. En este contexto, el modelo presentado a continuación es muy similar al propuesto anteriormente por Church y ReVelle (1994); sin embargo, presenta algunas variaciones respecto al modelo original. Para este modelo los índices a utilizar son i y j ; los conjuntos a utilizar son I, J y M donde I contiene a todos los puntos de demanda, J contiene a todos los posibles puntos de localización de almacenes y M es el conjunto de puntos que pueden ser parcial o completamente satisfechos. A continuación, se detallan los parámetros utilizados.

Parámetros

T: distancia máxima de cobertura parcial

S: distancia máxima de cobertura total

D_{ij}: distancia entre puntos para la localización de centros de distribución en j y puntos de demanda en i

C_{ij}: nivel de cobertura previsto del centro de distribución en j para el punto de demanda en i. Toma valor 1 si $D_{ij} \leq S$, toma el valor de $f(D_{ij})$ si $S< D_{ij} \leq T$ (donde $f(D_{ij}) \in [0,1]$) y toma valor 0 de cualquier otro modo.

Variables de decisión

Las variables a emplear son las siguientes.

Y_j: 1 si el centro de distribución es localizado en j, de otro modo toma valor 0

X_{ij}: 1 si el punto de demanda i es satisfecho parcial o completamente por el centro de distribución en j, de otra manera toma valor 0

P: número de centros de distribución colocados en M_i

El modelo es el siguiente.

Max $\sum_{i \in I} \sum_{j \in Mi} C_{ij} X_{ij}$ (1)

$\sum_{j \in J} y_j = P$ (2)

$x_{ij} \leq y_j \; \forall \; i \in I, j \in M_i$ (3)

$\sum_{j \in Mi} x_{ij} \leq 1 \; \forall \; i \in I$ (4)

$Y_j \in \{0,1\} \; \forall \; j \in J$ (5)

$X_{ij} \in \{0,1\} \; \forall \; i \in I, j \in M_i$ (6)

La función objetivo del modelo (1) maximiza el nivel de cobertura dentro de las distancias dentro de T. La primera restricción (2) sirve para determinar la cantidad total de centros de distribución establecidos. La segunda restricción (3) indica que, si se decide establecer un punto de distribución en i (haciendo que Y_j tome como valor 1), entonces se puede satisfacer el punto de demanda X_{ij}, ya sea total o parcialmente. La tercera restricción (4) indica que todos los puntos de demanda serán parcial o totalmente satisfechos por lo menos por un centro de distribución, Finalmente, la cuarta y quinta restricción (5 y 6) son las condiciones de existencia para X_{ij} y X_{ij} respectivamente.

Los resultados de este modelo indican que, si se hace una comparación con el modelo de la máxima cobertura original, utilizando los mismos conjuntos y parámetros, se puede apreciar que para un total de 100 réplicas existe una diferencia del 36.1% en la solución óptima, lo cual indica que por lo menos un centro de distribución es distinto en las soluciones de ambos modelos. Asimismo, los resultados sugieren que el nivel de cobertura aumenta si la cantidad de centros de distribución localizados también lo hace y que, la cantidad de puntos demandantes que son satisfechos parcialmente disminuirán siempre y cuando la cantidad de puntos completamente satisfechos vaya aumentando.

2.1.2. Aplicación a la logística humanitaria

Como se observó previamente, el problema de la máxima cobertura, ya sea parcial o total, resulta ser una herramienta muy útil para la localización de centros de distribución. Sin embargo, en una situación real existen más factores que deben ser tomados en cuenta para poder realizar un modelo adecuado. Por ello, Balcik y Beamon (2008) desarrollan un modelo que resulta ser una extensión del modelo de cobertura máxima explicado previamente que integra restricciones de tiempos de entrega, costos y de capacidad de almacenamiento. Este modelo se centra en determinar el número y la localización de centros de distribución, así como la cantidad de recursos a almacenar para maximizar los beneficios entregados a las personas afectadas.

Para la elaboración del modelo, Balcik y Beamon (2008) asumen que los lugares afectados pueden ser determinados probabilísticamente y que se van a distribuir múltiples tipos de recursos. Estos recursos son clasificados por su criticidad medida en tiempo de respuesta. La demanda puede ser satisfecha en distintos niveles de cobertura y se incorporan costos antes y después del desastre para calcular el costo total de localizar centros de distribución, costos de compra y almacenamiento de recursos y costos de distribución. Finalmente, se impone una capacidad de almacenamiento para los centros de distribución para controlar la cantidad de recursos almacenados en estos.

Los conjuntos a utilizar son S, N, K, donde S contiene todos los escenarios posibles, N contiene a los posibles lugares para colocar un almacén y K contiene al conjunto de tipos de suministros. Los índices son s, j y k donde $s \in S$, $j \in N$ y $k \in K$. Los parámetros para la resolución del modelo son los siguientes.

<u>Parámetros</u>

p_s: probabilidad de ocurrencia de un escenario s

d_{sk}: demanda esperada del suministro k en el escenario s

CAP_j: capacidad del centro de distribución j (en volumen)

γ_k: volumen por unidad del suministro de tipo k

B_0: fondos destinados para operar durante el predesastre (en $)

B_1: fondos destinados para operar en el posdesastre (en $)

F_j: costo fijo para establecer un centro de distribución

ρ_{jk}: costo unitario de adquirir y almacenar un suministro de tipo k en el centro de distribución j

c_{sjk}: costo unitario de enviar un suministro de tipo k a un centro de distribución j en el escenario s

t_{sjk}: tiempo para satisfacer la demanda de un suministro tipo k en un escenario s desde un centro de distribución j (en horas)

w_k: peso de criticidad para el suministro tipo k

l_k: nivel de cobertura de un suministro tipo k

α_k^{lk}: nivel de cobertura para el peso de criticidad

$N_s(l_k)$: posibles centros de distribución que pueden proveer un nivel de cobertura l_k de un suministro k en un escenario s

LR_k^{lk}: limite inferior para el tiempo a un nivel de cobertura l_k

UR_k^{lk}: limite superior para el tiempo a un nivel de cobertura l_k

Variables de decisión

Las variables de decisión son:

f_{sjk} : proporción de la demanda de los recursos tipo k satisfechos por el centro de distribución j en un escenario s

Q_{jk} : unidades del recurso tipo k almacenadas en el centro de distribución j

X_j : 1 si el centro de distribución j es localizado, caso contrario toma el valor 0

El modelo es el siguiente:

$$\max \sum_s \sum_k \sum_{l_k} \sum_{j \in N_s(l_k)} p_s d_{sk} w_k \alpha_k^{l_k} f_{sjk} \qquad (1)$$

$$f_{sjk} d_{sk} \leq Q_{jk} \; \forall\, s \in S, j \in N, k \in K \qquad (2)$$

$$\sum_{k \in K} \gamma_k Q_{jk} \leq Cap_j X_j \quad \forall j \in N, k \in K \qquad (3)$$

$$\sum_{j \in N} \left(F_j X_j + \sum_{k \in K} Q_{jk}\, \rho_{jk} \right) \leq B_0 \qquad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} d_{sk} c_{sjk} f_{sjk} \leq B_1 \quad \forall s \in S \qquad (5)$$

$$\sum_{j \in N} f_{sjk} \leq 1 \quad \forall s \in S, k \in K \qquad (6)$$

$$f_{sjk} \geq 0 \quad \forall s \in S, j \in N, k \in K \qquad (7)$$

$$X_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in N \qquad (8)$$

La función objetivo del modelo (1) tiene como función maximizar la demanda esperada cubierta en todos los niveles de cobertura por todos los centros de distribución en todos los escenarios probables, tomando en cuenta la criticidad de los recursos. La restricción (2) indica que la proporción de la demanda satisfecha del recurso tipo k en el escenario s de un centro de distribución j no debe ser mayor a la cantidad de recursos tipo k almacenados en el centro de distribución j. La restricción (3) indica que si X_j toma valor 1, entonces se localizara el almacén y la suma de la cantidad de recursos tipo k almacenados en un centro de distribución j no debe exceder a su capacidad de almacenamiento; si es que X_j toma valor 0, entonces no se localizará un almacén en este nodo y la restricción no es tomada en cuenta. La restricción (4) indica que si X_j toma valor 1, la suma del costo fijo de localizar un almacén en j (X_jF_j) más los costos de adquirir y almacenar recursos tipo k en j no debe exceder al presupuesto inicial asignado antes del desastre B0; en caso X_j tome valor 0, entonces no se localizará un centro de distribución en j. La restricción (5) indica que la suma los costos del envío de la demanda esperada de los recursos tipo k en el escenario s desde un centro de distribución j no debe ser superior al presupuesto asignado para la distribución de recurso luego del desastre B1. La restricción (6) indica que la suma de todas proporciones de la demanda de recursos tipo k en el escenario s debe ser menor o igual a 1 para un centro de distribución j , lo cual indica que, si f_{sjk} toma 1 como valor, entonces esto significaría que toda la demanda de un tipo de suministro k fue satisfecha en la población j en el escenario s, pero si toma 0 como valor entonces se deduce que el centro de distribución j no pudo atender la demanda del suministro k en el escenario s. La restricción (7) indica que la proporción de la demanda de un recurso tipo k en un escenario s para un centro de distribución j debe ser mayor o igual a 0. Finalmente, la restricción (8) es la condición binaria para la variable x.

Los resultados brindados por este modelo tienen como principal característica que dependen mucho de la cantidad de fondos asignados tanto antes como después del desastre (parámetros B_0 y B_1 respectivamente). En este sentido, si el fondo disponible antes del desastre es variable y el fondo luego del desastre es fijo, el número de centros de distribución localizados comienza siendo 1 y luego empieza a aumentar según aumenten los fondos variables. Entonces, se entiende que la calidad de cobertura de los centros de distribución aumenta según estos lo hacen. Por otro lado, si los fondos después del desastre son variables y los fondos antes del desastre son fijos, los resultados nos muestran que los centros de distribución serán más centralizados y por ello los costos de distribución serán altos. Finalmente, si ambos fondos son variables se observa una mejora en el tiempo de respuesta y en la demanda satisfecha.

En adición a esto, Yilmaz y Kabak (2016) proponen un modelo multiobjetivo que se caracteriza por utilizar centros de distribución temporales que serán localizados en la zona afectada por un desastre, denominados centros de distribución locales, y centros de distribución permanentes que serán localizados fuera de la posible zona afectada por un desastre, denominados centros de distribución principales. Este modelo tiene como fin minimizar distancia entre puntos de oferta y demanda y minimizar la cantidad de centros de distribución establecidos. Para esto, el modelo tiene como conjuntos a K, J e I, donde K se refiere al conjunto de puntos demandantes, J al conjunto de centros de distribución local e I al conjunto de centros de distribución principales. Los parámetros que este modelo utiliza se muestran a continuación.

<u>Parámetros</u>

tal_k: demanda de los puntos k k, donde $k \in K$

s_j: Suministros del centro de distribución local j , donde j $j \in J$

d_{jk} Distancia entre un centro de distribución local en j y un punto demandante k, donde $k \in K$ y $j \in J$

dis_{ij} : Distancia entre un centro de distribución local en j y uno principal en i, donde $i \in I$ y $j \in J$

<u>Variables de decisión</u>

Las variables a encontrar son las siguientes:

a_{ij}: 1 si el centro de distribución central i alimenta al centro de distribución local j, de otro modo toma valor 0

b_{jk}1 si el centro de distribución local j satisface la demanda del punto k, de otro modo toma valor 0

x_i:1 si se decide abrir un centro de distribución central en i, de otro modo toma valor 0

y_j: 1 si se decide abrir un centro de distribución local en j, de otro modo toma valor 0

t_{jk}: demanda satisfecha en el punto k por el centro de distribución local en j

El modelo sigue la siguiente estructura:

$\text{Min } \sum_j \sum_k d_{jk} * b_{jk}$ (obj 1.1)

$\text{Min } \sum_i \sum_j dis_{ij} * a_{ij}$ (obj 1.2)

$\text{Min } \sum_j y_j$ (obj 2.1)

$\text{Min } \sum_i x_i$ (obj 2.2)

$\sum_j t_{jk} \geq tal_k$, para $\forall$ k (1)

$\sum_k t_{jk} \geq s_j$, para $\forall$ j (2)

$a_{ij} \leq x_i$, para $\forall$ i, j (3)

$b_{jk} \leq y_j$, para $\forall$ j, k (4)

$y_j \leq \sum_i a_{ij}$, para $\forall$ j (5)

$\sum_k t_{jk} \leq My_j$, para $\forall$ j (6)

$t_{jk} \leq Mb_{jk}$, para $\forall$ j, k (7)

$\sum_{j=1}^{n} b_{jk} \geq 2$, para $\forall$ k (8)

En este modelo, los objetivos 1.1 y 1.2 se encargan de minimizar la distancia entre puntos de demanda y centros de distribución locales y la distancia entre centros de distribución locales y principales respectivamente mientras que los objetivos 2.1 y 2.2 minimizan la cantidad de centros de distribución locales y principales respectivamente. De estos objetivos se debe rescatar la importancia de los centros de distribución principales, ya que estos serán quienes brinden los suministros necesarios a los centros de distribución locales, por lo que se intuye que como mínimo siempre se debe tener un centro de distribución principal, en cualquier caso. En el caso de las restricciones, la primera de ellas (1) indica que la demanda en el punto k satisfecha por los centros de distribución en j debe ser mayor a la demanda total en ese punto, esto indica que el modelo pretende satisfacer toda la demanda en todos los puntos k alcanzados. La segunda restricción (2) indica que la suma de la demanda satisfecha en el punto k por el centro de distribución j debe ser menor o igual a la cantidad de suministros disponibles en el centro de distribución local j, lo cual indica que la cantidad de suministros disponibles siempre debe ser suficiente para satisfacer la demanda de un punto. La tercera, cuarta y quinta restricción (3, 4 y 5) son las que hacen posible la red de distribución, ya que, si x_i toma valor 1, entonces se localizará un centro de distribución principal en i, lo cual hace que sea posible localizar un centro de distribución local en j, solo si y_j toma valor 1, para satisfacer el punto de demanda k; en caso $y_j$tome valor 0, entonces no se atenderá la demanda del punto k. Las restricciones (6) y (7) aseguran que, si se abre un centro de distribución local en j, este satisface la sumatoria de la demanda en los puntos k que son atendidos por este centro de distribución. Finalmente, la octava restricción (8) asegura que cada punto de demanda k sea satisfecho por lo menos por dos centros de distribución local, lo cual asegura que la demanda del punto k sea cubierta en su totalidad.

Adicionalmente, luego de resolver el modelo cuatro veces (una para cada objetivo), se plantea una nueva función objetivo y nuevas restricciones que son elaboradas tomando en cuenta los cuatro resultados obtenidos previamente, esto para asegurar un resultado que minimice las cuatro funciones objetivo a la vez y restricciones que permitan logar esto. Las nuevas variables y el modelo propuesto es el que se muestra a continuación.

Variables de decisión

$dpoz_1^+$: desviación para la función objetivo 1.1

$dpoz_2^+$: desviación para la función objetivo 1.2

$dpoz_3^+$: desviación para la función objetivo 2.1

$dpoz_4^+$: desviación para la función objetivo 2.2

Parámetros

obj1: valor obtenido la función objetivo 1.1

obj2: valor obtenido la función objetivo 1.2

obj3: valor obtenido la función objetivo 2.1

obj4: valor obtenido la función objetivo 2.2

Nuevo modelo

$$\text{Min } \mathrm{dpoz}_1^+ + \mathrm{dpoz}_2^+ + \mathrm{dpoz}_3^+ + \mathrm{dpoz}_4^+ \qquad (9)$$

$$\sum_j \sum_k \mathrm{d}_{jk} * \mathrm{b}_{jk} - \mathrm{dpoz}_1^+ = \mathrm{obj1} \qquad (10)$$

$$\sum_i \sum_k \mathrm{dis}_{ij} * \mathrm{a}_{ij} - \mathrm{dpoz}_2^+ = \mathrm{obj2} \qquad (11)$$

$$\sum_j \mathrm{Y}_j - \mathrm{dpoz}_3^+ = \mathrm{obj3} \qquad (12)$$

$$\sum_i \mathrm{X}_i - \mathrm{dpoz}_3^+ = \mathrm{obj4} \qquad (13)$$

De esta manera, la nueva función objetivo (9) permite minimizar la desviación total obtenida de los cuatro objetivos anteriores, mientras que, de la misma manera, las restricciones (10), (11), (12) y (13) permiten determinar las desviaciones de los objetivos (1.1), (1.2), (2.1) y (2.2), respectivamente, tomando como limite el valor obtenido en cada uno de los objetivos previos. Los resultados de este modelo sugieren que la cantidad de centros locales, principales y puntos demandantes satisfechos siguen una relación directamente proporcional; es decir, mientras más centros de distribución principales sean abiertos mayor será la cantidad de centros de distribución locales, lo cual permite satisfacer una mayor cantidad de puntos demandantes.

Maharjan y Hanaoka (2016) realizan un modelo que puede ser aplicado en Nepal en caso de que ocurra un desastre. Este modelo, al igual que el elaborado por Balcik y Beamon (2008), se basa en el problema de la máxima cobertura realizado por Church y ReVelle (1974) y tiene como finalidad maximizar la cantidad de personas atendidas luego de un desastre. Para este modelo se utilizan los conjuntos I y J, donde I contiene a todos los puntos demandantes, mientras J tiene a los posibles puntos de localización para almacenes. Los índices son i y j, donde i pertenece a I y j a J. Los parámetros utilizados en este modelo son los que se muestran a continuación.

Parámetros

a_j : demanda en el nodo $i \in I$

P : número de almacenes a localizar

N_T : valor mínimo para el índice de accesibilidad del transporte

N_V : valor mínimo para el índice de desarrollo

N_S : valor mínimo para el índice de seguridad

T_j : valor para el índice de accesibilidad de transporte para en punto j

V_j : valor para el índice de desarrollo del punto j

S_j : valor para el índice de seguridad para el punto j

Variables

Las variables que el modelo utiliza son:

X_j : 1 si se decide localizar un almacén en el punto j, 0 de cualquier otra manera

Y_i : 1 si se decide que el punto demandante i es atendido, 0 de cualquier otra manera

El modelo sigue la siguiente estructura

$$\text{Max} \sum a_i Y_i \qquad (1)$$

$$\sum X_j \geq Y_i, \qquad \forall\ i \in I, j \in J \qquad (2)$$

$$\sum X_j \leq P, \qquad \forall\ j \in J \qquad (3)$$

$$\sum T_j X_j \geq N_T \sum X_j, \quad \forall\ j \in J \qquad (4)$$

$$\sum V_j X_j \geq N_V \sum X_j, \quad \forall\ j \in J \qquad (5)$$

$$\sum S_j X_j \geq N_S \sum X_j, \quad \forall\ j \in J \qquad (6)$$

$$Xj \in \{0,1\}, \qquad \forall\ j \in J \qquad (7)$$

$Yj \in \{0,1\}, \qquad \forall\ j \in J \qquad (8)$

En este modelo, la función objetivo (1) tiene como fin maximizar la cantidad de personas atendidas luego de un desastre; para esto, el valor de Y_i debe ser 1, ya que de esta manera se asegura que se atienda el punto de demanda i. La primera restricción (2) indica que si se decide atender la población Y_i, que ocurre cuando esta variable toma como valor 1, entonces se debe localizar uno o más almacenes en el punto i, lo cual indica que por lo menos un valor de X_j debe ser 1 dentro de la sumatoria; de otra manera, no se localizará un almacén en j. La segunda restricción (3) asegura que la cantidad total de almacenes localizados no sea superior a la cantidad disponible de almacenes. Las restricciones (4), (5) y (6) indican que, si se decide localizar almacenes en los puntos j, lo cual se logra cuando X_j toma como valor 1, entonces se deben cumplir ciertos criterios que aseguren que se cumpla un estándar para esta selección. En este caso, el modelo sugiere que se deben superar los valores mínimos para los índices de accesibilidad de transporte, desarrollo y seguridad (restricciones 4, 5 y 6 respectivamente) establecidos como parámetros anteriormente y, en caso de que estos valores mínimos no sean superados, se deberá optar por otra selección de puntos para la localización de almacenes. Finalmente, la sexta y séptima restricción (7 y 8) son las condiciones de existencia binaria para las variables X_j y Y_i.

Asimismo, para obtener un resultado más acertado, la función objetivo es alterada para considerar la prioridad con la que se atiende a un punto de demanda en función a la densidad poblacional. En este sentido, la función objetivo mejorada se muestra a continuación**:** Max $\sum p_i a_i Y_i$, donde

<u>Parámetro</u>

p_i : valor para la prioridad de atención en función a la densidad poblacional de i

Los resultados del modelo sugieren que la cantidad de almacenes localizados depende de la cantidad de puntos demandantes que se desean satisfacer; es decir, si se decide atender a muchos puntos de demanda, entonces se requerirán más almacenes. Sin embargo, lo autores indican que la cantidad de almacenes puede disminuir dependiendo del nivel de cobertura que posean. Esto quiere decir que, si los almacenes tienen un radio de cobertura amplio, entonces no se requerirá de muchos de estos para cubrir la demanda, pero de esto se puede interpretar que es posible que el tiempo de atención de la demanda disminuya, ya que la frecuencia con la que los puntos de demanda son satisfechos es menor que cuando se tienen más almacenes localizados.

Otro modelo matemático que puede ser aplicado a la logística humanitaria es el propuesto por Özdamar, Ekinci y Bücükyazici (2004) que tiene como base al vehicule routing problem. Este problema toma en consideración aspectos como la disponibilidad de las rutas, los tipos y cantidad de vehículos a emplear, los tipos, cantidad y demanda los de suministros disponibles y la capacidad de carga de los vehículos. Por ello, este problema se trata de un modelo matemático multiproducto, multiperiodo y multivínculo cuya finalidad es la de minimizar la cantidad de demanda insatisfecha de cierto recurso en un nodo en específico en cualquier momento. Los índices de este problema son a, o, t, v, m y p. Los conjuntos que este problema utiliza son:

Conjuntos

T: longitud del horizonte de planeamiento

C: conjunto de todos los nodos

M: conjunto de modos de transporte

CD: conjunto de nodos demandantes incluyendo los nodos de transbordo

CS: conjunto de nodos de oferta

RO: conjunto de nodos totales excepto el nodo ficticio

A: conjunto de recursos

$\mathrm{V_m}$: conjunto que contiene a los tipos de vehículos para cada tipo de transporte m

<u>Parámetros</u>

Asimismo, los parámetros asociados son:

do: nodo ficticio para representar la disponibilidad de vehículos

$\mathrm{t_{opm}}$: tiempo requerido para movilizarse desde o a p, utilizando el medio de transporte m

$\mathrm{d_{aot}}$: cantidad demandada o disponible del suministro de tipo a en el nodo o en el instante de tiempo t

$\mathrm{av_{ovmt}}$: cantidad de vehículos de tipo v en el modo de transporte m disponible en el nodo o añadidos en el tiempo t

$\mathrm{w_a}$: peso por unidad de del suministro tipo a

$\mathrm{cap_{v,}}$: capacidad de carga del vehículo v en el modo de transporte m

<u>Variables de decisión</u>

Las variables de decisión son:

Z_{aopmt}: cantidad de un recurso "a" transportado desde "o" a "p" en un periodo "t" en un medio de transporte "m".

dev_{aot}: demanda insatisfecha de un recurso "a" en un nodo "o" en un periodo de tiempo "t".

Y_{opvmt}: número de vehículos de tipo "v" en el medio de transporte "m" que va desde "o" a "p" en un tiempo "t".

sur_{ovmt}: número de vehículos de tipo "v" en el modo de transporte "m" que espera en el nodo "o" en un periodo "t".

El modelo matemático es el siguiente:

$$min \sum_{a \in A} \sum_{O \in CD} \sum_{t} dev_{aot} \qquad (0)$$

$$\sum_{q=1}^{t} \sum_{m \in M} \left[-\sum_{p \in C} Z_{apom,(q-tpom)} + \sum_{p \in C} Z_{aopmq} \right] - dev_{aot} = \sum_{q=1}^{t} d_{aoq} \qquad (1)$$

$(\forall\ a \in A, o\ \in CS, t\ \in T)$

$$\sum_{q=1}^{t} \sum_{m \in M} \left[-\sum_{p \in C} Z_{apom,(q-tpom)} + \sum_{p \in C} Z_{aopmq} \right] \leq \sum_{q=1}^{t} d_{aoq} \qquad (2)$$

$(\forall\ a \in A, o\ \in CS, t\ \in T)$

$$Y_{opvmt} \leq t_{opm}K \ \ (\forall \{o,p\} \subseteq RO, v\ \in Vm, m\ \in M, t\ \in T) \qquad (3)$$

$$Z_{a,do,pmt} + Z_{ap,do,mt} = 0, (\forall\ a\ \in A, p \subseteq RO, m\ \in M, t\ \in T) \qquad (4)$$

$$\sum_{v \in Vm} Y_{opvmt}\, cap_{vm}\ \geq \sum_{a \in A} w_a\, Z_{aopmt}\ \ (\forall \{o,p\} \subseteq C, t\ \in T, m\ \in M) \qquad (5)$$

$$\sum_{q=1}^{t} \sum_{p \in C} Y_{povm,(q-t_{pom})} - sur_{ovmt} = \sum_{q=1}^{t} \sum_{p \in C} Y_{opvmq} \qquad (6)$$

$(\forall\ o \in RO, v\ \in Vm, m\ \in M, t\ \in T)$

$$\sum_{q=1}^{t} Y_{do,ovmq} \leq \sum_{q=1}^{t} av_{ovmq}\ \ \ (\forall\ o \in RO, v\ \in Vm, m\ \in M, t\ \in T) \qquad (7)$$

$$Y_{opmvt} \geq 0\ y\ entero, Z_{aopmt} \geq 0;\ deb_{aot} \geq 0;\ sur_{ovmt} \geq 0\ y\ entero \qquad (8)$$

La función objetivo (0) del modelo indica que se debe minimizar la cantidad de demanda insatisfecha en todo horizonte de tiempo. La primera restricción (1) sirve para poder balancear la cantidad de recursos que entran y salen del nodo de demanda “o”. La segunda restricción (2) indica que la cantidad de suministros que se transportan en toda la red de distribución debe ser menor o igual a la cantidad disponible de suministros. La tercera restricción (3) evita asignar un vehículo de tipo "m" a una ruta si es que esta no existe para este tipo de vehículo; es decir, el valor de Y_{opvmt} nunca será más grande al de t_{opm}K porque K es un número muy grande. La cuarta restricción (4) sirve para evitar que se asignen recursos para el nodo "do", ya que este se utiliza como un nodo imaginario del cual los vehículos parten. La quinta restricción (5) evita que la cantidad de recursos que se transportan en una ruta supere la capacidad de carga del vehículo asignado, por lo que, si Y_{opvmt} toma un valor 0 en todo instante t, entonces se puede decir que ningún suministro de tipo a será transportado desde el nodo o hasta el p. La sexta (6) sirve para indicar la cantidad de vehículos que se encuentran viajando de nodo a nodo en todo instante de tiempo, por lo que, si sur_{ovmt} toma valor 0, entonces se entiende que todos los vehículos se encuentran viajando de un nodo a otro. La séptima restricción (7) evita que se utilicen más vehículos de los que se tienen. Finalmente, la octava restricción (8) sirve para establecer los límites de existencia para las varíales a utilizar.

En adición, Seblati et al. (2017) proponen un modelo que tiene como fin analizar el costo total incurrido por distribuir bienes de ayuda humanitaria a las zonas afectadas luego de un desastre. Para este modelo, los índices empleados son i, j y k, donde i y j representan los nodos de oferta o demanda disponibles respectivamente y k el tipo de suministro. Asimismo, respecto a los parámetros se considera que el parámetro demanda de los suministros d_{jk} toma en cuenta aspectos como la población total afectada (p_j), la cantidad de suministros requeridos por persona (r_k), el tiempo en el que un centro de distribución está listo para enviar suministros (t_s) y el porcentaje de la demanda satisfecha en el nodo demandante (q_s). El parámetro d_{jk} se formula a continuación.

$$d_{jk} = p_j r_k (\sum_s t_s q_s), \forall j, k$$

Los otros parámetros empleados se listan a continuación.

Parámetros

n_N: cantidad de puntos de demanda

n_C: cantidad de tipos de suministros

C_{ij}: distancia entre los puntos i y j

V_k: volumen unitario del suministro de tipo k

W_k: peso unitario del suministro de tipo k

V: capacidad volumétrica de un centro de distribución

W: capacidad de peso de un centro de distribución

N_i: número máximo de centros de distribución para el punto i

a: cantidad máxima de puntos que puede atender un centro de distribución

b: cantidad máxima de centros de distribución por los que puede ser atendido un punto demandante

N_t : cantidad máxima de centros de distribución disponibles

$R_{k_p k_q}$: ratio de distribución entre los suministros k_p y k_q para una distribución balanceada

S_i : nivel de seguridad de punto ofertante i

T_s : umbral para el nivel de seguridad

M: un número muy grande

Variables de decisión

Las variables a emplear son las siguientes.

Z_i: número de centros de distribución localizados en el punto i

X_{ijk}: cantidad del suministro de tipo k que será entregado por el centro de distribución en i a la población afectada en j

Y_{ij}: 1 si se decide que el centro de distribución en i satisface al punto j, 0 de ser el caso contrario

El modelo sigue la siguiente estructura.

Min $f_1 = \sum_{i=1}^{n_N} \sum_{j=1}^{n_N} \sum_{k=1}^{n_C} C_{ij} X_{ijk}$ (1)

$\sum_{i=1}^{n_N} X_{ijk} \geq d_{jk}$, ∀ j, k (2)

$R_{k_p k_q} X_{ijk_p} = R_{k_p k_q} X_{ijk_q}$, ∀ j, k; ∀ kp, kq ∈k (3)

$\sum_{j=1}^{n_N} \sum_{k=1}^{n_C} V_k X_{ijk} \leq V Z_i$, ∀ i (4)

$\sum_{j=1}^{n_N} \sum_{k=1}^{n_C} W_k X_{ijk} \leq W Z_i$, ∀ i (5)

$Z_i \leq N_i \left(\sum_{j=1}^{n_N} \sum_{k=1}^{n_C} X_{ijk} \right)$, ∀ i (6)

$\sum_{j=1}^{n_N} Y_{ij} \leq \alpha$, ∀ i (7)

$\sum_{i=1}^{n_N} Y_{ij} \leq \beta$, ∀ j (8)

$\sum_{k=1}^{n_C} X_{ijk} \leq M Y_{ij}$, ∀ i, j (9)

$Y_{ij} \leq \sum_{k=1}^{n_C} X_{ijk}$, ∀ i, j (10)

$Z_i \leq N_i$, ∀ i (11)

$\sum_{i=1}^{n_N} Z_i \leq N_T$ (12)

$Z_i = 0$, ∃ i ∈ {i: $S_i \leq T_s$} (13)

$Z_i \in \mathbb{Z}^+$U {0}, ∀ i (14)

$X_{ijk} \in \mathbb{Z}^+$U {0}, ∀ i, j, k (15)

$Y_{ij} \in \{0,1\}$, ∀ i, j (16)

En este modelo, la función objetivo (1) tiene como finalidad minimizar distancia total la distribución de los bienes en toda la red de suministros. La primera restricción (2) indica que la demanda del suministro tipo k en el punto demandante j debe ser satisfecho en su totalidad. La segunda restricción (3) sirve para asegurar que el ratio de distribución de cualquier tipo de suministros es el suficiente para satisfacer al punto demandante j. En la tercera restricción (4), se indica que todos los suministros que son distribuidos desde el centro de distribución en i no deben superar su capacidad máxima en volumen. De la misma manera, en la cuarta restricción (5) se indica lo mismo, pero teniendo como límite al peso máximo, por lo que el modelo toma en consideración tanto el peso como el volumen máximo que permiten los almacenes. La quinta restricción (6) indica que, si no se decide atender la demanda de un tipo de suministro de tipo k en un punto demandante j, entonces no se debe abrir un centro de distribución en i. La sexta restricción (7) asegura que un centro de distribución i no puede satisfacer más puntos de demanda j de los que es capaz, De forma similar, la séptima restricción (8) indica la cantidad de centros de distribución i que satisfacen un punto demandante j no puede exceder la cantidad preestablecida en el parámetro b. En la octava y novena restricción (9 y 10) se asegura que si se desea que un centro de distribución i satisfaga a un punto j, entonces la cantidad de suministros a entregar debe ser mayor a 0 y, para que esto ocurra, Y_{ij} debe tomar valor 1, pues de esta manera se asegura que el punto ofertante i atienda al punto demandante j; de otra manera, si Y_{ij} toma valor 0, entonces el valor de X_{ijk} también sería 0 pues el punto i no estaría atendiendo al punto j, lo cual evita que exista una transferencia d suministros entre estos puntos. Las décimas y undécimas restricciones (11 y 12) indican que la cantidad de centros de distribución establecidos en un punto i no debe superar a su capacidad y que la cantidad de centros de distribución total no debe exceder a la cantidad disponible. Finalmente, los ítems (13) a (16), son las condiciones de existencia para las variables Z_i, X_{ijk} y Y_{ij}.

Este modelo se resuelve una vez y con el resultado obtenido se resuelve el modelo una vez más agregando una nueva restricción y cambiando la función objetivo, que esta vez tiene como finalidad minimizar la cantidad total de centros de distribución sin aumentar distancia total obtenida previamente significativamente, por lo que se entiende que se busca encontrar una cantidad mínima de centros de distribución que satisfagan la misma cantidad de puntos que se encontraron en la primera corrida del modelo. Al modelo reformulado se le agrega una restricción más y se presenta a continuación.

Modelo

min $\boldsymbol{f2} = \sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{n_N}} \boldsymbol{Z_i}$

Restricciones (2) a (16) presentado previamente y además:

$$\sum_{i=1}^{n_N} \sum_{j=1}^{n_N} \sum_{k=1}^{n_C} C_{ij} X_{ijk} \leq f_1 + \varepsilon \qquad (17)$$

De esta manera, la última restricción (17) asegura que la distancia total recorrida para la distribución de los bienes en toda la red establecida sea igual o menor a la hallada previamente tomando en cuenta un error de estimación (ε). Finalmente, los resultados del modelo indican que existe una diferencia entre la primera y segunda corrida del modelo pues la distancia total recorrida se redujo cerca de un 23%, lo cual muestra que la última restricción agregada al modelo (17), además de asegurar de que no se exceda el límite de centros de distribución disponibles, reduce la cobertura de la red de distribución. Esta restricción resulta ser muy útil en casos en los que se cuente con una cantidad máxima disponible de centros de distribución o en casos en los que no se debe exceder un presupuesto determinado. Sin embargo, si se desea maximizar la cantidad de puntos de demanda atendidos, entonces no será recomendable tomar esta restricción en cuenta.

De los modelos analizados se puede observar que gran parte de ellos toman el problema de la máxima cobertura como base y que adaptan este problema a las necesidades de la logística humanitaria. En este caso en particular, toman en cuenta variables que deben ser analizadas luego de un desastre, como la cantidad de personas afectadas, la cantidad de suministros disponibles, la capacidad de carga de los vehículos, etc. Si bien es cierto que la formulación de estos modelos puede resultar ser una herramienta importante en la logística humanitaria, los resultados obtenidos por estos deben ser tomados con cautela, pues según Kunz et al. (2016)

los desastres son de carácter impredecible y, por lo tanto, sus consecuencias también lo son. Por ello, estos modelos deben ser utilizados para obtener resultados referenciales de lo que podría ocurrir en caso suceda un desastre, pues las consecuencias de este dependen de las características de vulnerabilidad que acompañan a la población afectada.

3. CONCLUSIONES

Del estudio previamente realizado se puede concluir lo siguiente:

- Un fenómeno natural solo puede ser llamado desastre cuando la ocurrencia de este y las condiciones de la vulnerabilidad entran en contacto y afecta de manera negativa a la población.
- La logística humanitaria tiene similitudes con su contraparte comercial. Sin embargo, se diferencia de esta en las características únicas del entorno en el que opera, pues mientras la logística comercial busca entregar un producto final a un cliente, la logística humanitaria tiene como finalidad entregar suministros que pueden significar la diferencia entre la vida y la muerte de una persona.
- Existen distintas maneras en las que se puede medir el desempeño de la logística humanitaria. Una de ellas y las más importante pueden ser los parámetros de salida, pues en este aspecto se toman en cuenta factores como el tiempo de respuestas ante un desastre y la cantidad de suministros disponibles para la repartición de bienes, pues estos aspectos resultan muy importantes para las personas afectadas por el desastre.
- Los modelos matemáticos propuestos varían según el tipo de desastre y de las condiciones del país en el que se aplican. En este sentido, para su elaboración se deben tener en cuenta las condiciones de vulnerabilidad asociadas a esa población, pues una mala estimación significaría que el modelo puede resultar ineficiente.
- Debido al contexto en el que la logística humanitaria opera, se puede encontrar cierta similitud entre los modelos analizados, como por ejemplo los parámetros analizados y las variables que se desean encontrar.
- El problema de la máxima cobertura realizado por Church y ReVelle (1974) resulta ser una base muy útil para la elaboración de modelos matemáticos aplicados a la logística humanitaria, pues permite estimar la cantidad necesaria de almacenes a localizar para cubrir

la mayor cantidad de puntos demandantes. Asimismo, la versión del problema propuesto por Karsakal y Karsakal (2004) resulta ser un complemento muy importante dentro de la logística humanitaria, pues este modelo considera que es posible cubrir total y parcialmente los puntos de demanda, mientras que el modelo propuesto por Church y ReVelle (1974) solo considera a aquellos puntos que pueden ser satisfechos completamente.

- La función objetivo y las restricciones del modelo deben ser propuestas en función a lo que se desea obtener y las condiciones bajo las que se espera operar. Por ejemplo, pueden darse casos en los que se necesite atender a la mayor cantidad de personas posibles, por ello se requerirá que la función objetivo permita tener un mayor nivel de cobertura, lo cual puede ser logrado localizando una gran cantidad de almacenes en la red de distribución. Adicionalmente, si se cuenta con una cantidad limitada de almacenes disponibles, con un presupuesto determinado para la localización de estos o con una cantidad limitada de suministros dividida por tipos, entonces estos aspectos deben ser tomados en cuenta para la elaboración de las restricciones.
- Para obtener una mejor precisión en los resultados, algunos autores como Seblati et al. (2017) y Maharjan y Hanaoka (2016) sugieren resolver el modelo más de una vez, ya que la primera corrida del modelo puede servir para obtener ciertos resultados que pueden ser útiles para elaborar restricciones extras a las ya propuestas**, y** de esa manera, correr el modelo una segunda vez tomando en cuenta los resultados previos y obtener resultados mas precisos.

REFERENCIAS

Balcik. B., & Beamon, B.M. (2008). Facility location un humanitarian relief. International Journal of Logistics, 11(2), 101-121. https://doi.org/10.1080/13675560701561789

Beamon, B.M., & Balcik, B. (2008). Performance measurement in humanitarian relief chains. International Journal of Public Sector Management, 21(1), 4-25. https://doi.org/10.1108/09513550810846087

Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (s.f.). General Classification. https://www.emdat.be/classification

Church, R., & ReVelle, C. (1974). The maximal covering location problem. Papers of the Regional Science Association, 32(1), 101-118.

Daud, M. S. M., Hussein, M. Z. S. M., Nasir, M. E., Abdullah, R., Kassim, R., Suliman, M. S., & Salu-Din, M. R. (2016). Humanitarian logistics and its challenges: The literature review. International Journal of Supply Chain Management, 5(3), 107-110.

Instituto Nacional de Defensa Civil (2006). Manual básico para la estimación del riesgo. http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc319/doc319_contenido.pdf

Karasakal, O., & Karasakal K, (2004). A maximal covering location model in presence of partial coverage. Computers & Operations Research, 31(9), 1515-1526. https://doi.org/10.1016/S0305-0548(03)00105-9

Kovács, G., & Spens, K. (2009). Identifying challenges in humanitarian logistics. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 36(6), 506-528. https://doi.org/10.1108/09600030910985848

Kunz, N., Van Wassenhove, L.N, Besiou, M., Hambye C., & Kovács, G. (2017). Relevance of humanitarian logistics research: best practices and way forward. International Journal of Operations & Production Management, 37(11), 1585-1599. https://doi.org/10.1108/IJOPM-04-2016-0202

Maharjan, R., & Hanaoka, S. (2017). Warehouse location determination for humanitarian relief distribution in Nepal. Transportation research procedia, 25, 1151-1163. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.128

Özdamar, L., Ekinci, E., & Bücükyazici, B. (2004) Emergency logistics planning in natural disasters. Annals of operations research, 129(1-4), 217-245. https://doi.org/10.1023/B:ANOR.0000030690.27939.39

Romero, G. & Maskrey, A. (1993). Como entender los desastres naturales. En A. Maskrey (Ed.) Los desastres no son naturales (pp. 6-10). La red.

Seblati, A., Cavdur, F., & Kose-Kucuk, M. (2017) Determination of relief supplies demands and allocation of temporary disaster response facilities. Transportation research procedia, 22, 245-254. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.031

Stock, J.R., & Boyer. S.L. (2009). Developing a consensus definition of supply chain management: a qualitative study. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 39(8), 690-711. https://doi.org/10.1108/09600030910996323

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2007). Vulnerability. https://www.undrr.org/terminology/vulnerability

United Nations Inter-Agency Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction (2009). UNISDR terminology on disaster risk reduction. https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2020). UNDRR ROAMC Webinar: #LosDesastresNoSonNaturales desde los espacios de trabajo. https://www.undrr.org/es/event/undrr-roamc-webinar-losdesastresnosonnaturales-desde-los-espacios-de-trabajo

Viera, O., Moscatelli, S., & Mercader, L.T. (2012). Logística Humanitaria y su aplicación en Uruguay. Gerencia Tecnológica Informática, 11(30), 47-56.

Wilches-Chaux, G. (1993) La vulnerabilidad global. En A. Maskrey (Ed.) Los desastres no son naturales (pp. 11-41). La red.

Yilmaz, H., & Kabak, Ö. (2016). A multiple objective mathematical program to determine locations of disaster response distribution centers. IFAC-PapersOnLine, 49(12), 520-525. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.682

Zevallos, J. (2008). Zeballos, J. L. (2008). La ayuda humanitaria internacional en casos de desastres. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica, 25(2), 230-232.