

Modelos matemáticos para la evacuación de personas en la cadena de suministro humanitaria: una revisión

Mathematical models for the evacuation in the humanitarian supply chain: a review

Francisca Santana-Robles ^a, Rafael Granillo-Macias ^b, Berenice Armas-Álvarez ^c, Zaraeli Beltrán-Rodríguez ^d

Abstract:

Natural disasters represent a global threat, since they are related to climate change. Due to the destructive nature of these natural phenomena, the economic and social impact it leaves on populations and countries is considerably high. The humanitarian supply chain is gaining great interest in academia, business, and government because of its relevance to dealing with natural disasters. In this paper, a literature review of mathematical models of evacuation in the humanitarian supply chain was carried out. 36% of the articles are oriented to the pre-disaster phase, 32% to post-disaster and 32% in an integrated phase. Likewise, 83% of the articles propose deterministic models and 17% non-deterministic. The most common methods to solve optimization models are metaheuristics algorithms, network flow and vehicle routing problem. On the other hand, the methods proposed to solve the models without optimization are stochastic programming, probabilistic models, Markov processes and agent-based models. As future work, it could be suggested to address problems focused on the pre-disaster stage with multiple periods of time in order to establish adequate strategies with more complete preparations.

Keywords:

Humanitarian Supply Chain, humanitarian logistics, mathematical models, optimization, natural disasters

Resumen:

En la actualidad los desastres naturales representan una amenaza a nivel mundial, ya que se relacionan con el cambio climático. Debido a la naturaleza destructiva de estos fenómenos naturales, el impacto económico y social que deja en las poblaciones y países es considerablemente alto. La cadena de suministro humanitaria está logrando gran interés tanto en ámbito académico, empresarial y gubernamental debido a su relevancia para hacer frente a los desastres naturales. En el presente trabajo, se realizó una revisión de la literatura de modelos matemáticos de evacuación en la cadena de suministro humanitaria. El 36% de los artículos se orientan a la fase pre-desastre, 32% a pos-desastre y 32% en una fase integrada. Asimismo, el 83% de los artículos plantean modelos determinísticos y el 17% no determinísticos. Los métodos más comunes para resolver los modelos de optimización son algoritmos metaheurísticos, flujo de redes y problema de enrutamiento de vehículos. Por su parte, los métodos planteados para resolver los modelos sin optimización son programación estocástica, modelos probabilísticos, procesos de Markov y modelos basados en agentes. Como trabajos futuros podría sugerirse abordar problemas enfocados a la etapa de pre-desastre con múltiples periodos de tiempo para poder establecer estrategias adecuadas con preparativos más completos.

Palabras Clave:

Cadena de suministro humanitaria, logística humanitaria, modelos matemáticos, optimización, desastres naturales.

Introducción

En los últimos años han ocurrido diferentes desastres naturales en el mundo, como inundaciones, terremotos,

Autor de correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-3301-9790>, Email: profe_7739@uaeh.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-1015-667X>, Email: rafaelgm@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0003-4382-5603>, Email: ar399602@uaeh.edu.mx

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0001-9221-4302>, Email: be334292@uaeh.edu.mx

Fecha de recepción: 30/09/2022, Fecha de aceptación: 24/11/2022, Fecha de publicación: 05/01/2023

DOI: <https://doi.org/10.29057/escs.v10i19.9902>



huracanes, incendios forestales, entre otros; causando grandes pérdidas materiales y humanas. Este tipo de desastres representan una amenaza a nivel mundial, ya que se relacionan con el cambio climático y se espera que incrementen con el paso del tiempo.

El cambio climático ha influido en el incremento de desastres naturales, en el año 2021 ocurrieron alrededor de 401 en el mundo, como puede observarse en la Figura 1, donde el Pacífico asiático fue el que sufrió la mayor cantidad (Jaganmohan, 2022).

De acuerdo a la Organización de Naciones Unidas (2019), el 90% de los desastres naturales está relacionado al cambio climático. Por lo que, se espera una mayor frecuencia e intensidad de este tipo de fenómeno en el futuro.

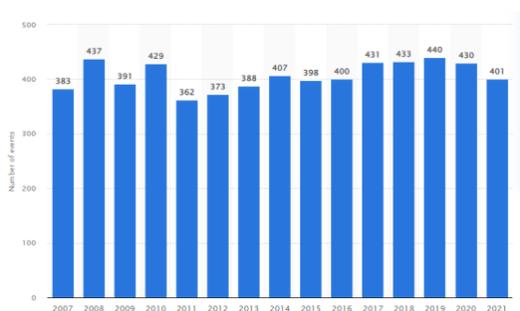


Figura 1. Desastres naturales ocurridos en el mundo, de 2007 a 2021.

Fuente: Jaganmohan, (2022).

Existen diferentes tipos de desastres naturales; sin embargo, los más comunes son: terremotos, sequías, tormentas, inundaciones, actividad volcánica, temperaturas extremas, deslizamiento de la tierra e incendios forestales, de los 401 desastres ocurridos en el año 2021, 223 fueron inundaciones, lo que representa el 56% (Szmigiera, 2022). De acuerdo a su tipología y considerando la raíz de dicho desastre, pueden considerarse como naturales, seminaturales y antrópicos. De los cuales, se derivan diversos fenómenos donde la responsabilidad humana puede variar según su grado de participación. Algunos de los fenómenos mencionados tienen una estrecha relación con su subtipología en el ámbito natural, ya que pueden ser geográficos o biológicos y dependiendo de ello, se puede observar el impacto que conlleva dicho fenómeno en el espacio, este puede ser el subsuelo, la superficie terrestre, la atmósfera, la micro y macro fauna, así como la flora (Capacci y Mangano, 2015).

Debido a la naturaleza destructiva de estos fenómenos naturales, el impacto económico y social que deja en las

poblaciones y países es considerablemente alto. Además, representan una gran amenaza alrededor del mundo, ya que, se ha percibido un incremento, y se espera que aumenten a consecuencia del cambio climático. Por lo que, resulta de gran interés para los tomadores de decisiones en lo político, social y económico, encontrar alternativas de solución para hacer frente a dichos problemas de manera anticipada y planeada.

Siguiendo un orden cronológico, los procesos de administración de emergencia pueden ser divididos en cuatro fases, incluyendo mitigación, preparación, respuesta y recuperación. Las fases de mitigación y preparación son previas al desastre, las cuales buscan disminuir las probabilidades de un desastre o minimizar sus efectos y pérdidas. Las fases de respuesta y recuperación son fases posteriores al desastre. La fase de respuesta busca minimizar los efectos del desastre, ayudando a las personas lo más rápido posible y evitando más pérdidas, mientras que la fase de recuperación se refiere a apoyar a la comunidad en su esfuerzo para volver a la normalidad (Hu, 2019).

Por otra parte, la cadena de suministro humanitaria (HSC, por sus siglas en inglés) atrae cada vez más la atención de los investigadores debido a su relevancia para hacer frente a los desastres naturales. Su principal objetivo es brindar protección a las personas afectadas y proveer materiales indispensables para su supervivencia.

Después de una revisión de artículos publicados en diversas revistas científicas, pudo conocerse que no hay trabajos enfocados a la revisión de la literatura de modelos matemáticos para la evacuación de personas, que es lo que se aborda en esta propuesta. La evacuación masiva de personas requiere de planes que consideren tanto la etapa de pre-desastre como pos-desastre que aseguren la utilización óptima de los recursos.

El presente trabajo, se encuentra organizado como sigue: en la sección 2 se presenta la definición de HSC. La sección 3 describe la metodología utilizada para la selección y análisis de artículos. La sección 4 muestra la clasificación de los modelos matemáticos agrupándolos como de optimización y sin optimización. Finalmente, la sección 5 presenta las conclusiones y principales hallazgos.

Cadena de suministro humanitaria

La cadena de suministro humanitaria (Humanitarian Supply Chain, HSC) está ganando gran interés tanto en ámbito académico, empresarial y gubernamental debido a su relevancia para hacer frente a los desastres naturales. La HSC se encarga de estudiar diversos problemas, como

son: ubicación de instalaciones, distribución de ayuda, inventarios y evacuación masiva de personas. La ubicación de las instalaciones se refiere a la localización de los almacenes y centros de distribución de los recursos de emergencia. La distribución, estudia cómo debería conformarse la red de distribución, el tipo de transporte y la capacidad que se requiere para el socorro de las personas. Los problemas de inventarios se enfocan en determinar el nivel y disponibilidad de los recursos de ayuda, minimizar costos y determinación de la demanda. Además, el problema de evacuación masiva de personas incluye la localización de los albergues, la concentración de los puntos de evacuación, la selección del transporte, así como la gestión del tráfico, y el periodo de tiempo que conlleva la evacuación (Santana-Robles et al., 2021).

Debido a la trascendencia de la logística humanitaria, han surgido diversas revistas científicas que abordan dicho tema; además, se han publicado una gran cantidad de artículos relacionados. Algunos de los temas que más han sido abordados en la literatura con relación a la administración de la HSC son: logística humanitaria, propiedades de la cadena de suministro humanitaria y recursos necesarios para una administración eficiente y eficaz de las operaciones humanitarias (Behl y Dutta, 2018). Además, otros temas de gran interés son: *coordinación logística, logística tradicional, administración de la cadena de suministro versus administración de la cadena de suministro humanitaria, medidas de desempeño y modelado* (Chiappetta et al., 2019).

Por otro lado, con respecto a las fases de desastre, la menos estudiada es la de pre-desastre. Sin embargo, es un tema de gran relevancia para hacer frente a las operaciones y gestión de desastres (Hezam et al., 2020).

Con relación a la toma de decisiones en la fase de pos-desastre, existe una gran cantidad de propuestas en la literatura para la optimización de la distribución de la ayuda humanitaria desde diferentes enfoques de modelado. Sin embargo, de acuerdo a la complejidad y dificultad para la toma de decisiones, aún existen temas por abordar. Algunos temas de interés para investigaciones futuras son: la caracterización de los intereses de las víctimas, investigación sistemática de redes de servicio multinivel (Zhang y Cui, 2021).

Metodología

Para lograr el objetivo del presente trabajo se consideró una metodología de revisión sistemática de la literatura, que permite resumir la investigación realizada sobre un tema particular y encontrar elementos que ayuden a generar nuevo conocimiento. La metodología considera 4 fases (Tranfield et al., 2003):

- 1) Planeación. En esta fase, se plantean las preguntas que guiarán la investigación. Las preguntas formuladas son: (1) ¿Cuáles son las características de los modelos matemáticos propuestos para la evacuación masiva de personas? (2) ¿Cuál es la brecha de investigación encontrada para trabajos futuros?
- 2) Búsqueda. Se buscaron artículos en bases de datos (Web of Science, Scopus y Google Scholar) utilizando las palabras clave "humanitarian supply chain", "relief supply chain", "humanitarian logistics", "relief distribution and evacuation" de 2016 a 2022. En la base de datos de Web of Science se encontraron 147 artículos, 326 en Scopus y 1342 en Google Scholar. Asimismo, se amplió la búsqueda haciendo una revisión del listado de referencias de los artículos encontrados.
- 3) Evaluación. En esta etapa se establecieron criterios de inclusión y exclusión. Se seleccionaron artículos que usaron modelos matemáticos de optimización para la evacuación de personas en la HSC, de 2016 a 2022. Además, se descartaron los artículos que no utilizaban modelos matemáticos, así como aquellos que no estaban enfocados a la HSC. También se omitieron los artículos de revisión, duplicados y aquellos publicados en congresos.
- 4) Extracción. En esta fase, los artículos seleccionados fueron revisados y analizados para encontrar las características de los modelos planteados.

Clasificación de modelos matemáticos para la evacuación

Modelos matemáticos de evacuación con optimización

Debido a la naturaleza de los problemas abordados en la cadena de suministro, los modelos matemáticos de optimización son de gran interés, ya que se busca minimizar el tiempo de espera de atención, tanto en la evacuación, como en la distribución de los artículos humanitarios, atendiendo la mayor cantidad de víctimas al menor costo posible. La tabla 1 muestra la clasificación de modelos de evacuación considerando la optimización de recursos. Además, se clasifican de acuerdo a la etapa de desastre; así como el tipo de modelo (determinístico y no determinístico), problema abordado, método, técnica de solución, tipo de objetivo, función objetivo y validación de resultados.

Tabla 1: Modelos de evacuación con optimización

Autores	Tipo de desastre	Fase de desastre			Tipo de modelo		Problema abordado	Método de solución	Tipo de función objetivo		Función objetivo	Resultados	
		Pre-desastre	Integrado	Post-desastre	Determinístico	No determinístico			Simple	Múltiple		Aleatorio	Caso de estudio
Mollah, et al. (2018)	Inundación			X	X		Distribución de ayuda y asignación de refugios durante un evento de inundación, multiperiodo, dividiendo la zona en bloques prioritarios	Algoritmo genético (GA) y programación mixta entera	X		Maximizar la evacuación y minimizar el riesgo y el tiempo de evacuación		X
Kimms & Maiwald (2017)	Diversos escenarios	X			X		Modelo de evacuación, multiperiodo, con una evacuación advertida	Flujo de red y Modelo de planificación de la evacuación basado en la transmisión de células (CTEPM)	X		Minimizar el peligro total expuesto	X	
Taneja & Bolia (2018)	Diversos escenarios			X		X	Toma de decisiones óptimas mediante estrategia de gestión de multitudes durante el proceso de evacuación	Modelo de elección de ruta simultánea		X	Minimizar el tiempo de evacuación, basado en el comportamiento del individuo, un número determinado de líderes y en un vector de capacidad	X	

											de reconfiguración y flujo de rutas		
Zeng et al. (2021)	Diversos escenarios			X	X		Simula el proceso de evacuación dinámica del tráfico mixto en los enlaces y en las intersecciones de múltiples modos de autobuses y coches	Problema de enrutamiento de vehículos de reparto dividido (SDVRP), modelo de transmisión celular bidireccional de eliminación de conflictos (BCECTM) y algoritmo genético (GA) con un esquema de codificación de posición de cromosomas	X		Minimizar el tiempo total de evacuación integrando el BCECTM y el SDVRP		X
Baou et al. (2018)	Diversos escenarios	X			X		Planificación de redes efectivas de distribución de ayuda en desastres	Modelo de programación lineal mixta y algoritmo heurístico		X	Minimizar el tiempo total necesario para evacuar a toda la población desde el conjunto de		X

											puntos de partida, respetando las restricciones relacionadas		
Molina et al. (2018)	Diversos escenarios			X	X		Problema multiobjetivo de enrutamiento de vehículos capacitados con múltiples viajes	Multi-inicio con selección inteligente de vecindarios (MSINS)		X	Minimizar el número de vehículos, minimizar el costo total de viaje y minimización de la latencia máxima		X
Babaei & Shahanaghi (2018)	Diversos escenarios			X		X	Problema de asignación en condiciones de incertidumbre, considerando una respuesta rápida y estable para las diferentes situaciones	Recocido simulado (SA)		X	Minimizar el coste total de establecimiento de la ubicación de emergencia, minimizar el coste de construir camino y minimizar el número de ambulancias necesarias en cada escenario	X	

Jha et al. (2017)	Diversos escenarios			X	X		Considera múltiples caminos entre dos lugares cualesquiera y la interrupción de los campamentos y caminos debido a factores naturales	Algoritmo genético de ordenación no dominante - III (NSGA-III)		X	Minimizar el coste de montaje, aprovisionamiento transporte entre el proveedor y los campamentos de socorro, minimizar la diferencia entre la demanda y la oferta de la cadena de socorro.	X	
Saatchi et al. (2021)	Diversos escenarios		X		X		Gestión de desastres y sus subconjuntos en el diseño de redes de socorro de emergencia	Algoritmo genético de ordenación no dominante (NSGA-II), recocido simulado (SA), búsqueda de vecindario variable (VNS)		X	Maximizar la fiabilidad del sistema, minimizar el coste total del sistema logístico de ayuda.	X	
Agarwal et al. (2021)	Ciclón		X		X		Modelo matemático para el preposicionamiento de existencias, localización de instalaciones y la planeación de la evacuación en	Enfoque clásico (CA), algoritmo de búsqueda de patrones (PSA), Algoritmo genético (GA)		X	Minimizar el coste total del establecimiento de las instalaciones y adquisición de drones, minimizar el número total		X

							el diseño de la red HSC				de clientes sin cobertura.		
Nayeri et al. (2020)	Diversos escenarios	X			X		Planeación de los recursos de emergencia disponibles para un desastre	Algoritmo genético (GA), método de búsqueda aleatoria basado en la población estándar (PSO)		X	Minimizar la suma del tiempo de finalización ponderado del relieve operación, minimizar la suma de los tiempos de derivación.	X	
Zhu et al. (2019)	Inundación			X	X		Atención a las víctimas lesionadas debido a las inundaciones por medio de rutas de socorro de emergencia	Optimización de la colonia de hormigas (ACO)		X	Minimizar el coste de transporte, minimizar el coste de privación absoluta, minimizar el coste de privación relativa.		X

Uno de los trabajos propuestos en la literatura es el de Mollah et al., donde se plantea un modelo para la distribución de ayuda y asignación de refugios, multiperiodo, se divide la zona afectada en bloques prioritarios de acuerdo a diversas variables propuestas; se resuelve utilizando algoritmos genéticos (GA), (Mollah et al., 2018).

Por otro lado, los autores Kimms y Maiwald proponen un modelo enfocado a escenarios advertidos, es decir, aquellos escenarios que ya se conocen y tienen previsto que pasarán en determinada zona. El modelo se elaboró mediante el flujo de red y modelo de planificación de la evacuación basado en la transmisión de células (CTEPM), tomando en cuenta variables como calles, automóviles, carriles, entre otros; todo esto para minimizar el riesgo de peligro (Kimms y Maiwald, 2017).

En el trabajo de Taneja y Bolia, por su parte, utilizan un modelo de elección de ruta simultánea para elaborar un modelo matemático que busca hacer decisiones óptimas mediante la estrategia de gestión de multitudes en algún caso de emergencia en busca de salvaguardar la vida de las personas; utilizando líderes que se encarguen de guiar a los evacuados por las mejores rutas (Taneja y Bolia, 2018).

Los autores Zeng et al., emplearon un modelo utilizando el problema de enrutamiento de vehículos de reparto dividido (SDVRP), modelo de transmisión celular bidireccional de eliminación de conflictos (BCECTM) y GA con un esquema de codificación de posición de cromosomas para simular un proceso de evacuación; tomando en cuenta variables como el número de vehículos, número de evacuados, capacidad del vehículo, número de carriles y capacidad de la celda (Zeng et al., 2021).

El modelo planteado por Baou et al., está formulado mediante un modelo de programación lineal entera mixta y resuelto con un algoritmo heurístico, mismo que aborda las necesidades de las personas capaces, heridas o discapacitadas que son evacuadas desde múltiples lugares de recogida y transportadas por vehículos (Baou et al., 2018).

Molina et al., proponen un modelo con un problema de enrutamiento de vehículos entrenados multiobjetivo para la evacuación de personas afectadas en la catástrofe; utilizando el algoritmo de múltiple inicio con selección inteligente de vecindarios (MSINS) para minimizar el número de vehículos, el costo total de viaje y la latencia máxima (Molina et al., 2018).

Babaei, y Shahanaghi sugieren un modelo desarrollado con un algoritmo de recocido simulado (SA) para analizar un problema de localización/asignación de rutas de emergencia en condiciones de incertidumbre; utilizando algunas variables como ambulancias, capacidad en

hospitales y capacidad en emergencias, (Babaei y Shahanaghi, 2018).

En el trabajo de Jha et al., se presenta una cadena de ayuda humanitaria que incluye evacuación y suministro de bienes de socorro, modelado través de programación entera mixta que se resuelve mediante el algoritmo genético de ordenación no dominante (NSGA-III), (Jha et al., 2017).

En Saatchi et al., proponen un modelo que integra las fases de pre-desastre y pos-desastre para la localización de hospitales, centros de distribución, ruteo para la distribución de la ayuda humanitaria y ruteo para la evacuación de personas afectadas, a través de un modelo de optimización resuelto con algoritmos genéticos (NSGA-II), recocido simulado (SA), y búsqueda de vecindario variable (VNS), (Saatchi et al., 2021).

Agarwal et al., desarrollaron un modelo enfocado en resolver cuestiones de preposicionamiento de existencias, localización de instalaciones y planeación de la evacuación en la cadena de suministro humanitaria para minimizar el coste total de la misma. Utilizaron técnicas de optimización como: el enfoque clásico (AC), algoritmo de búsqueda de patrones (PSA) y algoritmos genéticos GA (Agarwal et al., 2021).

En Nayeri et al., formulan un modelo de programación multiobjetivo mixto-entero para la asignación y programación de los equipos de rescate considerando las diversas capacidades de los rescatistas, los efectos de la fatiga y el tiempo de privación; a través de algoritmos genéticos (GA) y el método de búsqueda aleatoria basado en la población estándar (PSO), (Nayeri et al., 2020).

Los autores Zhu et al., abordaron la evacuación con un modelo que considera grados de lesión idénticos y diversos, alivio psicológico a las víctimas ante suministros de socorro ilimitados y el control de costes operativos mediante el uso de la optimización de la colonia de hormigas (ACO), (Zhu et al., 2019).

Tabla 2: Modelos de evacuación sin optimización

Autores	Tipo de desastre	Fase de desastre			Descripción del problema	Método, técnica o herramienta de solución	Resultados	
		Pre-desastre	Integrado	Post-desastre			Aleatorio	Caso de estudio
Brachman et al. (2020)	Incendio forestal			X	Se analizan datos empíricos de evacuaciones anteriores para determinar la ruta tomada por los evacuados para identificar la estrategia de orientación utilizada	Análisis de redes		X
Sopha et al. (2019)	Actividad volcánica		X		Se aborda la dinámica de evacuación, mecanismo de coordinación y estrategias para la entrega de ayuda de la última milla	Modelo basado en agentes		X
Wild et al. (2021)	Actividad volcánica		X		Se trata de un modelo para la toma de decisiones de gestión de emergencias, adaptable a regiones, tomando en cuenta el tiempo de llamada de evacuación, de notificación pública, de preparación del evacuado y de viaje más allá de la zona de evacuación	Método de análisis espacial		X
Harris et al. (2022)	Huracán	X			Presenta un modelo para la dinámica de un sistema de evacuación antes de un huracán, determinando los factores más importantes y cómo interactúan en una serie de escenarios reales, tomando en cuenta el comportamiento humano	Modelo basado en agentes	X	X
Davidson et al. (2020)	Huracán		X		La dinámica, la incertidumbre y las interacciones humanas en sistemas naturales	Modelo de programación estocástica multietapa		X
Blanton et al (2020)	Huracán		X		Incertidumbre con las predicciones de los huracanes	Modelo hidrológico y circulación avanzada		x

Hwang & Heo (2021)	Diversos escenarios		X		Evacuación de personas por medio de mejoras estratégicas basadas en datos recopilados de desastres anteriores.	Modelo basado en agentes		X
Melendez et al. (2021)	Incendio forestal		X		Falta de datos de transporte, sensores actualizados sobre las densidades, flujos y velocidades actuales del tráfico en muchas regiones de los Estados Unidos	Modelo de densidad agregada		X
Guan & Chen (2021)	Huracán	X			Modelo de transición de estado a nivel individual integrado en el comportamiento para predecir en línea la demanda de evacuación	Proceso de Markov con probabilidades de transición variables en el tiempo		X
Favereau et al. (2022)	Desprendimientos de tierra provocados por lluvias torrenciales	X			Análisis de la distribución de evacuados en escenarios de desplazamientos de tierra debido a lluvias torrenciales.	Modelo de distribución de Rayleigh		X
Zhang et al. (2021)	Diversos escenarios	X			Evacuación óptima de peatones en escenarios con múltiples salidas	Modelo de múltiples salidas		X
Rambha et al. (2021)	Huracán	X			Estimación de la demanda de evacuación durante el siniestro, multiperiodo, de acuerdo a la decisión de los individuos	Modelos de elección dinámica de horizonte finito	X	
Urata & Pel (2017)	Diversos escenarios	X			Reconocimiento de factores que influyen en el reconocimiento del riesgo en las evacuaciones	Modelo de decisión, de elección discreta		X

Modelos de evacuación sin optimización

Dentro de los modelos encontrados en la literatura, existen propuestas donde no es considerada la optimización de recursos. La tabla 2, muestra la clasificación de este tipo de modelos. Para lo cual, se consideró tipo de desastre, fase de desastre, tipo de problema, método, técnica o herramienta de solución, y tipo de datos para la validación de resultados.

En el trabajo de Brachman et al., se plantea un análisis de redes para comparar las distintas rutas de evacuación que tomaron los encuestados, con el fin de determinar la distancia más corta para evacuar (Brachman et al., 2020). En Sopha et al., presentan un modelo para comprender el mecanismo de toma de decisiones individuales que están implícitas en la dinámica de la evacuación desde su ubicación real hasta los refugios más cercanos; tomando variables como la capacidad de transporte, kilometraje, refugios y carreteras, (Sopha et al., 2019).

Por su parte, Wild et al., abordan un problema mediante métodos de análisis espacial para evaluar la exposición de la población y transporte para la evacuación, utilizando una combinación de enfoques geospaciales y estadísticas, (Wild et al., 2021).

Harris et al., muestran el laboratorio de pronóstico para explorar el sistema de evacuación (FLEE) que incluye modelos de peligro natural y dos modelos basados en agentes (ABM) que replican los flujos de información, decisiones de evacuación, infraestructura vial y pronósticos e información de advertencia, (Harris et al., 2022).

En Davidson et al., desarrollan un marco integrado de evacuación basado en escenarios (ISE) para apoyar la toma de decisiones de evacuación de huracanes con modelo de programación estocástica multietapa; que toma en cuenta variables de tiempo, percepción de riesgo, locación geográfica y las decisiones de evacuación. Este modelo busca comprender las características que presentan los huracanes, desde la incertidumbre de las predicciones (Davidson et al., 2020).

El modelo propuesto por Blanton et al., proporciona un marco para calcular la predicción de huracanes por medio del modelo meteorológico Coupled Routing and Excess Storage, modelo hidrológico y circulación avanzada (Blanton et al., 2020).

En Hwang & Heo, proponen un modelo de evacuación de emergencia para verificar de manera realista la efectividad de una estrategia de evacuación utilizando NetLogo y ABM toolbox (Hwang & Heo, 2021).

Los autores Melendez et al., estudian un problema de densidad agregada para predecir las densidades de los vehículos en las redes de evacuación como apoyo en la planificación del transporte y la gestión de la emergencia, (Melendez et al., 2021).

En el trabajo de Guan & Chen, se aborda un modelo de proceso de Markov para predecir el comportamiento de la demanda de evacuación en situaciones de huracanes (Guan & Chen (2021)).

Por su parte, Favereau et al. (2022) propone un modelo para el caso de desprendimiento de tierra provocado por lluvias torrenciales, donde utiliza un ajuste de la distribución sigmoidea (distribución de Rayleigh) y aspectos como territorio, geología, clima, intervención humana (Favereau et al., (2022)).

En Zhang et al., se estudia un modelo de evacuación para peatones con múltiples salidas, donde se evalúa la distancia entre peatones, la densidad de peatones y el ancho de las salidas principales.

Los autores Rambha et al., plantean un modelo, multiperiodo, dinámico, de elección discreta, con horizonte finito, en el que los evacuantes deciden entre evacuar o no evacuar. Este modelo usa el algoritmo anidado y un método de máxima verosimilitud para evaluar sus parámetros (Rambha et al., 2021).

Urata y Pel (2018) formulan un modelo de elección discreta de evacuación de reconocimiento de riesgo que evalúa cuantitativamente la influencia de las medidas de mitigación de la catástrofe, educación sobre riesgo y la información sobre el mismo.

Conclusiones y principales hallazgos

En el presente trabajo se realizó una revisión de la literatura de modelos matemáticos de evacuación en la cadena de suministro humanitaria. Se encontró que los tipos de desastres estudiados son: inundación, ciclones y diversos escenarios; haciendo referencia aquellos modelos que están orientados a diversos tipos de desastres.

De los trabajos revisados, se encontró que, el 52% fueron planteados como modelos sin optimización y el 48% como modelos de optimización. El 36% de los artículos se orientan a la fase pre-desastre, 32% al pos-desastre y 32% en una fase integrada de ambos. Asimismo, el 83% de los artículos plantean modelos determinísticos y el 17% no determinísticos. Además, con respecto a los modelos de optimización, el 75% se formulan con una función multiobjetivo; los métodos más comunes para resolverlos son metaheurísticos (algoritmos genéticos, NSGA-II, NSGA-III, recocido simulado, búsqueda de vecindario variable, optimización de la colonia de hormigas), flujo de redes y problema de enrutamiento de vehículos. Con respecto a los modelos sin optimización, están enfocados a estudiar diferentes estrategias de evacuación considerando diferentes escenarios, como la incertidumbre en la predicción de desastres, la dinámica de la evacuación y el comportamiento humano. Algunos de los métodos o técnicas planteadas para resolver dichos

problemas son: programación estocástica, modelos probabilísticos, procesos de Markov y modelos basados en agentes. Como trabajos futuros podría sugerirse abordar problemas enfocados a la etapa de pre-desastre con múltiples periodos de tiempo para poder establecer estrategias adecuadas con preparativos más completos.

Referencias

- Behl, A., & Dutta, P. (2018). Humanitarian supply chain management: a thematic literature review and future directions of research. *Annals of Operations Research*, 283, 1001–1044. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2806-2>
- Capacci, A., & Mangano, S. (2015). Las catástrofes naturales. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 35–51. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281839793003>
- Chiappetta, C.J.; Sobreiro, V.A.; de Sousa Jabbour, A.B.L.; Campos, L.M.S.; Mariano, E.B.; Renwick, D.W.S. (2019). An analysis of the literature on humanitarian logistics and supply chain management: Paving the way for future studies. *Applications of OR in Disaster Relief Operations*, 283, 289–307. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2536-x>
- Hezam, I. M., & Nayeem, M. K. (2020). A Systematic Literature Review on Mathematical Models of Humanitarian Logistics. *Symmetry*, MDPI, 13(1), 11. <https://doi.org/10.3390/sym13010011>
- Hu, H., He, J., He, X., Yang, W., Nie, J., & Ran, B. (2019). Emergency material scheduling optimization model and algorithms: A review. *Journal of traffic and transportation engineering*, 5, 441-454. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.07.001>
- Jaganmohan, M. (2022). Annual number of natural disaster events globally from 2007 to 2021. Recuperado de <https://www.statista.com/statistics/510959/number-of-natural-disasters-events-globally/>
- Kimms, A., & Maiwald, M. (2017). An exact network flow formulation for cell-based evacuation in urban areas. *Naval Res Logistics*, 64, 547–555. <https://doi.org/10.1002/nav.21772>
- Madani S., H., Arshadi K., A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2021). Solving a new bi-objective model for relief logistics in a humanitarian supply chain by bi-objective meta-heuristic algorithms. *Scientia Iranica*, 28, 2948–2971. Doi: 10.24200/SCI.2020.53823.3438
- Melendez, B., Machiani, S. G., & Atsushi, N. (2021). Modelling traffic during Lilac Wildfire evacuation using cellular data. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 9(100335). <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100335>
- Mollah, A. K., Sadhukhan, S., Das, P., & Anis, M. Z. (2018). A cost optimization model and solutions for shelter allocation and relief distribution in flood scenario. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 1187–1198. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.11.018>
- Molina, J., López, A., Hernández, A., Martínez, I. (2017). A Multi-start Algorithm with Intelligent Neighborhood Selection for solving multi-objective humanitarian vehicle routing problems. 1-23. <https://doi.org/10.1007/s10732-017-9360-y>
- Nayeri, S., Tavakkoli-Moghaddam, R., Sazvar, Z., & Heydari, J. (2020). Solving an Emergency Resource Planning Problem with Deprivation Time by a Hybrid MetaHeuristic Algorithm. *Journal of Quality Engineering and Production Optimization*, 5(1), 65–86. Doi: 10.22070/JQEPO.2020.5379.1150
- Panwar, V., & Sen, S. (2019). Economic Impact of Natural Disasters: An Empirical Re-examination. *Margin: The Journal of Applied Economic Research*, 13(1), 109–139. <https://doi.org/10.1177/0973801018800087>
- Rambha, T., Nozick, L. K., & Davidson, R. (2021). Modeling hurricane evacuation behavior using a dynamic discrete choice framework. *Transportation Research Part B: Methodological*, 150, 75–100. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.06.003>
- Santana-Robles., F., Hernández-Gress, E. S., Hernández-Gress, N., & Granillo-Macias., R. (2021). Metaheuristics in the Humanitarian Supply Chain. *Algorithms*, 14(12), 364. <https://doi.org/10.3390/a14120364>
- Sopha, B. M., Achsan, R. E. D., & Asih, A. M. S. (2019). Mount Merapi eruption: Simulating dynamic evacuation and volunteer coordination using agent-based modeling approach. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 9(2), 292–322. <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-05-2018-0035>
- Szmigiera, M. (2022). Countries with the most natural disasters in 2021. Recuperado de <https://www.statista.com/statistics/269652/countries-with-the-most-natural-disasters/>
- Taneja, L., & Bolia, N. B. (2018). Pedestrian control measures for efficient emergency response management in mass gatherings. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 9(3), 273–290. <https://doi.org/10.1108/IJDRBE-07-2017-0045>
- Tranfield, D.; Denyer, D.; Smart, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *Br. J. Manag.* 2003, 14, 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- Urata, J., & PeI, A. J. (2018). People’s Risk Recognition Preceding Evacuation and Its Role in Demand Modeling and Planning. *Risk analysis*, 38(5), 889–905. <https://doi.org/10.1111/risa.12931>
- Wild, A. J., Bebbington, M. S., Lindsay, J. M., & Charlton, D. H. (2021). Modelling spatial population exposure and evacuation clearance time for the Auckland Volcanic Field, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 416(107282). <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107282>
- Zhang, L., Cui, N. (2021). Humanitarian logistics and emergency relief management: hot perspectives and its optimization approach, 5th International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Science (AEECS 2021), Vol. 245. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124503036>
- Zeng, M. H., Wang, M., Chen, Y., & Yang, Z. (2021). Dynamic evacuation optimization model based on conflict-eliminating cell transmission and split delivery vehicle routing. *Safety Science*, 137(105166). <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105166>
- Zhang, D., Huang, G., Ji, C., Liu, H., & Tang, Y. (2021). Pedestrian evacuation modeling and simulation in multi-exit scenarios. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 582(126272). <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126272>
- Zhu, L., Gong, Y., Xu, Y., & Gu, Y. (2019). Emergency relief routing models for injured victims considering equity and priority. *Annals of Operations Research*, 283, 1573–1606. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-3089-3>