

UN MODELO BI-CRITERIO PARA LA UBICACIÓN DE ALBERGUES, COMO PARTE DE UN PLAN DE EVACUACIÓN EN CASO DE INUNDACIONES

A BI-CRITERIA MODEL TO LOCATE SHELTERS AS PART OF AN EVACUATION PLAN IN THE CASE OF FLOODS

Juan Gaytán Iniestra¹, Pilar Ester Arroyo López^{1,*}, Ruth Enríquez Colón¹

RESUMEN

Una de las ciudades mexicanas afectada recurrentemente por inundaciones es la de Villahermosa, capital del Estado de Tabasco, el cual se ubica al sureste de la república mexicana. Las inundaciones frecuentes hacen necesario contar con un plan de ayuda para apoyar y garantizar la seguridad de la población afectada. El objetivo de esta investigación fue diseñar un plan de evacuación de la población en caso de inundación, el cual incluye: 1) la apertura de albergues y centros de distribución, con un inventario pre-posicionado de paquetes de ayuda y 2) la asignación de individuos a albergues y rutas para su evacuación. Empleando Sistemas de Información Geográfica y software especializado se simularon tres escenarios de inundación para la ciudad de Villahermosa: tirante de agua de 80 centímetros, 2 y 4 metros para identificar instalaciones que pudieran acondicionarse como albergues o centros de distribución, rutas de evacuación y zonas de la ciudad que resultarían inundadas. Esta información se utilizó como entrada de un modelo de programación lineal entera con dos objetivos: minimizar el tiempo total requerido para evacuar a las personas y minimizar el costo total de abrir albergues y centros de distribución, y de usar las rutas de comunicación para trasladar a la población y abastecer los albergues. Como estos son objetivos que están en conflicto, se generaron puntos selectos del frente de Pareto, mediante el método de los pesos y la ϵ -restricción, que corresponden a distintos planes preventivos de evacuación los que garantizan el uso óptimo de los recursos económicos. Los modelos se resolvieron empleando el Sistema General de Modelaje Algebraico; primero se obtuvo la solución de mínimo costo, que satisface todas las restricciones para después minimizar el tiempo total de evacuación. Los puntos generados representan, por tanto, opciones con costo diferente para evacuar a la totalidad de la población afectada, dependiendo de las exigencias en el tiempo total para completar la evacuación, las autoridades pueden elegir la opción de menor costo. Como a medida que aumenta el tirante de inundación es necesario abastecer más albergues y evacuar más personas, la dificultad para resolver los modelos de optimización fue mayor para el escenario de un tirante de agua de 4 metros. Las soluciones generadas para este escenario representaron una mejora al plan de evacuación implementado por las autoridades durante la inundación de 2007, que ha sido la más grave registrada para Villahermosa.

Palabras clave: Logística humanitaria, localización de albergues, optimización bi-criterio, sistemas de información geográfica.

¹ Departamento de Ingeniería Industrial, Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Tecnológico de Monterrey campus Toluca, Toluca, México

Autor para correspondencia: pilar.arroyo@itesm.mx

Recibido: 20.07.2012 Aceptado: 25.11.2012

ABSTRACT

One of the Mexican cities recurrently affected by floods is Villahermosa, capital of the state of Tabasco located at the Southeast of Mexico. The frequent floods make necessary to have a prevention strategy to assist the city's inhabitants and guarantee their safety. The objective of this research was to design an evacuation plan for the city's inhabitants in case of a severe flood, this plan needs to specify: 1) the number and location of shelters and distribution centers with a pre-positioned inventory and 2) the assignment of individuals to shelters as well as the selection of evacuation routes. Geographic Information Systems (GIS) and specialized software (ArcView and IDRISI) were used to simulate three different inundation scenarios for Villahermosa city: 80 centimeters, 2 and 4 meters of water flood and then identify sites that fulfill safety and capacity standards to be used as shelters or distribution centers; evacuation routes and city areas that may result inundated were also identified under each scenario. This information was used as entries for a integer linear programming (ILP) model with two objectives: minimize the total time required to evacuate all persons from the affected areas and minimize the total cost of furnishing shelters and distribution centers, and using the roads to evacuate the population and to transport supplies to the shelters. Since these two objectives are in conflict, selected points of the efficient frontier were obtained by using the weight method and ϵ -constraint; each solution represents an evacuation plan that makes optimal use of resources. The mathematical models were solved by using the General Algebraic Modeling System; first the minimal cost solution that satisfies all restrictions was generated, followed by the minimization of total evacuation. The solutions represent options of different costs to accomplish the evacuation of all affected inhabitants; depending on the total evacuation time desired, a particular plan may be chosen. As the height of the water flood increases, more shelters are required and more individuals need to be evacuated, in consequence the optimization models for the 4 meters scenario were more difficult to solve. In particular, the solutions generated under this scenario outperform the evacuation plan implemented by the designed authorities during the 2007 flood - the most severe inundation that affected Villahermosa in the past.

Keywords: Humanitarian logistics, shelter allocation, bi-criteria optimization model, Geographic Information Systems.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población mundial, el aumento en el número y tamaño de las ciudades, más el deterioro gradual del medioambiente, han incrementado el riesgo de ocurrencia de desastres naturales. Según Kleindorfer *et al.* (2005), por año ocurren alrededor de 500 desastres que afectan aproximadamente a 200 millones de personas y provocan alrededor de 75.000 muertes. Eventos recientes como el terremoto de Haití y el tsunami en Japón han motivado el diseño de planes de prevención y atención a las poblaciones damnificadas, que mejoren las acciones que despliegan las entidades gubernamentales y las organizaciones internacionales responsables de brindar ayuda humanitaria. Esta problemática de optimizar los planes de emergencia ante desastres naturales ha dado lugar al desarrollo de los conceptos de logística humanitaria y logística de desastres; el tema de estudio central de estas ramas de la logística es planear, responder y ayudar a la población que ha sido afectada por algún tipo de desastre, donde un desastre se define como un trastorno que afecta físicamente un sistema en su conjunto y pone en peligro sus capacidades y objetivos (Wassenhove, 2006).

Así como la logística de la cadena de suministro es crítica para el área empresarial, la logística de desastres lo es para el área humanitaria, ya que apoya la toma de decisiones antes (prevención), durante (atención y ayuda) y después (reconstrucción o recuperación) de la ocurrencia de un desastre. Thomas y Mizushima (2005) definen a la logística humanitaria

como el proceso de planificación, ejecución y control eficiente del flujo de efectivo y el depósito de mercancías y materiales, así como el manejo de la información desde el punto de origen al punto de destino, con el propósito de satisfacer las necesidades de las personas afectadas por eventos adversos, ya sea naturales (terremotos o inundaciones) o sociales (guerras o ataques terroristas).

Mientras la logística empresarial se centra en la administración óptima de los flujos de productos, efectivo e información hasta y desde la empresa, la logística humanitaria y de desastres se enfoca en mejorar el flujo de materiales hacia zonas afectadas, con el propósito de minimizar el sufrimiento humano. Los puntos más distintivos de la logística humanitaria son (Beamon, 2008): una demanda impredecible en tiempo, lugar y tipo de recursos; un tiempo de entrega cero que afecta dramáticamente la disponibilidad de inventario y la distribución; información incompleta, recursos limitados –humanos, económicos y tecnológicos- y medidas imprecisas para los resultados de las acciones.

Entre los desastres naturales están fenómenos hidrometeorológicos como huracanes, ciclones, fuertes precipitaciones y tsunamis, los cuales provocan inundaciones severas que afectan a individuos e instalaciones. En México, las inundaciones son el desastre natural más común. En el año de 2005, México ocupó el séptimo lugar en la lista mundial de países afectados por desastres naturales, siendo los desbordamientos de ríos provocados por distintas causas uno de los mayores riesgos. Según datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2011), en el 2008 un total de 307 municipios de 16 entidades federativas fueron declarados “en desastre” por la Secretaría de Gobernación. 212 de estos municipios fueron declarados en desastre a causa de lluvias, 87 por inundaciones y 26 por ciclones, destinándose una ayuda de 15 mil 893 millones de pesos mexicanos (aproximadamente 122.254.000 dólares americanos, USD) para atender a la población damnificada.

Para dar atención efectiva a las zonas afectadas por desastres, Wassenhove (2006) propone las siguientes tres etapas:

1. Preparación o prevención, en la cual se busca identificar lugares seguros para alojar a la población vulnerable y cubrir sus necesidades básicas (alimentación, salud y hospedaje) durante el desastre. El plan de prevención considera decisiones como la ubicación de albergues y centros de distribución, la definición de un inventario pre-posicionado y la especificación de rutas para evacuar a la población y transportar suministros. Las autoridades responsables deben conocer el plan de prevención y la población ha de estar informada de qué hacer en caso de que ocurra un desastre.

2. Respuesta al desastre. Esta etapa incluye todas aquellas actividades que se realizan una vez que se presenta el desastre y que implican la implementación del plan de prevención con los ajustes necesarios dada la situación real. Entre los aspectos distintivos de esta etapa se citan (Stepanov y MacGregor, 2009): la necesidad de tomar decisiones de qué acciones realizar bajo presión de tiempo y con información incompleta, informar de la alerta de evacuación a las personas, preparar los recursos para recibir y atender a la población (ejemplo albergues) y coordinar acciones.

3. Reconstrucción. Esta última etapa se inicia una vez que terminan las operaciones de ayuda, y su objetivo es asistir a los individuos para que se reintegren a sus actividades normales lo más pronto posible. Además de limpieza y reconstrucción de viviendas, puede requerirse de la reconstrucción de edificios públicos y de apoyo psicológico y social a los afectados.

Las operaciones de la logística de desastres resultan bastante complejas, debido a la incertidumbre en cuanto a la demanda de recursos y a la necesidad inmediata de movilizarlos. La

falta de información precisa, confiable y completa, dificulta la evaluación de las consecuencias del desastre (muertes, número de heridos, personas que se quedaron sin hogar y daños a infraestructura). Sofisticados sistemas de apoyo para la toma de decisiones (DSS-DM por sus siglas en inglés Decision Support Systems for Decision Making) ante desastres han sido desarrollados para establecer lo más pronto posible un diagnóstico de la gravedad del desastre que facilite la rápida toma de decisiones en cuanto a cómo intervenir para ofrecer apoyo (Tinguaro-Rodríguez *et al.*, 2011). Este tipo de sistemas se alimenta con información histórica sobre desastres, siendo procesado empleando técnicas estadísticas, de inteligencia artificial y de lógica borrosa para predecir los daños provocados por distintos fenómenos naturales.

Las actividades de apoyo ante un desastre requieren también de una alta coordinación entre varios actores. Las autoridades son en general quienes asumen el rol de coordinador de los esfuerzos de organizaciones no-gubernamentales (ONG), la sociedad civil y la propia comunidad afectada. En la etapa de prevención se recomienda establecer acuerdos sobre cómo estos distintos actores – gobierno, instituciones privadas, ONGs, individuos – coordinarán sus actividades para evitar duplicidad y un uso deficiente de recursos. En el caso de México, las secretarías responsables de la administración de desastres son la Secretaría de Gobernación a través del Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC), la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA) a través del ejército y el Centro de Prevención Nacional de Desastres (CENAPRED). Estas organizaciones trabajan en conjunto con algunas otras como: la Cruz Roja que moviliza rápidamente recursos hacia la zona afectada y cuenta con un centro de crisis con equipo de alta tecnología para establecer comunicación y mapear la zona afectada; Leche Industrializada Conasupo² (LICONSA) que está a cargo del envío de leche en polvo, suplementos alimenticios y agua hacia la zona de desastre y Sistema de Distribuidoras Conasupo (DICONSA) que cuenta con 3.500 unidades para el transporte de alimentos a las zonas afectadas. Para detalles sobre las responsabilidades de estas y otras organizaciones en la atención de desastres en México consultar el trabajo de Enríquez-Colón (2012).

Debido a la ocurrencia estacional de inundaciones en México y a la alta vulnerabilidad de ciertas localidades –entre ellas Villahermosa, la capital del Estado de Tabasco- es importante contar con planes de prevención que ofrezcan una respuesta rápida y eficaz a las necesidades de la población damnificada. El objetivo general de este trabajo fue apoyar en el diseño de un plan de prevención para evacuar y garantizar la integridad personal de los residentes de la ciudad de Villahermosa en caso de inundación. Para atender a este objetivo se formuló un modelo de optimización, cuya solución establece: 1) el número y ubicación de albergues y centros de distribución necesarios para atender a la población durante un período crítico de emergencia de cuatro días, 2) las rutas y modos de transporte a usar para evacuar a la población y 3) un plan de distribución de víveres y otros bienes de los centros de distribución a los albergues, que garantice una estancia adecuada de la población durante el período de emergencia.

Las preguntas de investigación planteadas fueron las siguientes:

¿Qué sitios cubren los requisitos de seguridad especificados por Protección Civil y la Cruz Roja, como para ser utilizados como albergues y centros de distribución ante diferentes escenarios de inundación?

¿Qué zonas de la ciudad resultarían afectadas bajo distintos escenarios de inundación?

² Conasupo son las siglas para la Compañía Nacional de Subsistencias Populares en México que fue una empresa paraestatal dedicada a actividades relacionadas con el sistema de abasto y la seguridad alimentaria en México. Desapareció en 1999 pero se ha dado continuidad a su objetivo de apoyar a que las comunidades marginadas tengan acceso a una buena alimentación a través de la gestión de otras organizaciones, principalmente de DICONSA.

¿Cuántos y cuáles albergues y centros de distribución conviene abrir y qué rutas hay que seguir para evacuar a la población, de tal manera que se optimice el costo y tiempo total de evacuación de los residentes afectados por una inundación?

¿Qué centros de distribución deben abastecer a cuáles albergues, y a qué albergue conviene remitir a los residentes de un Área Geoestadística Básica (AGEB) inundada?

¿Qué rutas y modos de transporte usar para trasladar a la población afectada a los albergues designados, de tal manera que se minimice el costo y tiempo de la evacuación?

La hipótesis central de esta investigación es que, a través de la optimización bi-criterio, se pueden mejorar las decisiones implícitas en las preguntas de investigación anteriores, en el sentido de reducir costos y mejorar el tiempo total de evacuación respecto a los planes, que con base a su experiencia, implementan las organizaciones y autoridades responsables.

Varias metodologías se han sugerido para resolver los problemas de logística de desastres; para este trabajo de investigación son relevantes las siguientes: programación matemática (PM), Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Simulación. A continuación se describen cada una de ellas.

Programación matemática que se centra en la construcción y solución de modelos de optimización, que mediante una o varias funciones objetivo y diferentes restricciones (no necesariamente lineales) describen la situación que se analiza; la solución a estos modelos busca generar los mejores valores para las variables de decisión. Decisiones críticas en la etapa de prevención como dónde ubicar albergues y cuáles rutas de evacuación utilizar se han atendido mediante la construcción de modelos de optimización. Por ejemplo, Dalal y Mohapatra (2007) propusieron un modelo de optimización para el caso de ciclones que afectan las costas de la India. El modelo consideró varios criterios de evaluación para la ubicación de los albergues como su fácil acceso, la total cobertura de la región y que sean instalaciones ya establecidas, como escuelas o gimnasios. El modelo planteado corresponde a un problema de ubicación Minimax, donde se minimiza la máxima distancia euclidiana que deberán recorrer los habitantes para llegar a un albergue. Por su parte, Balcik y Beamon (2008) propusieron un modelo de optimización que determina el número y la ubicación de los centros de distribución y la cantidad de suministros a almacenar en cada centro de distribución en caso de desastres repentinos. Para tomar estas decisiones se modelaron distintos escenarios correspondientes a diferentes grados de impacto del desastre natural; los escenarios se propusieron con base a datos históricos sobre el número de muertes ocurridas durante desastres repentinos, asignándose a cada escenario una probabilidad de ocurrencia basada en su frecuencia histórica.

Sistemas de Información Geográfica (SIG) que consisten en varias bases de datos y permiten la manipulación simultánea de mapas para relacionarlos entre sí y construir nuevos mapas con información sobre vías de comunicación, instalaciones, densidad de población, etc. Los SIG no únicamente permiten visualizar una zona con detalle, sino también construir diferentes escenarios para evaluar los daños que estos provocan en las poblaciones o la infraestructura; por ejemplo, qué áreas quedarán inundadas en caso de un evento hidrometeorológico de cierta magnitud. Prathumchai y Samarakoon (2005) usaron los SIG para diseñar un plan de emergencia en caso de inundaciones en un distrito de Bangladesh. Se usaron varios mapas: el primero mostraba las zonas inundadas y no inundadas en diferentes momentos de un episodio de lluvias intensas, lo que permitió estimar el daño a la población según el escenario. Un segundo mapa se usó para identificar escuelas y hospitales en la zona, que podían usarse como albergues, 63 sitios seguros fueron identificados. Mientras que las rutas de acceso a la zona, necesarias para definir un plan de distribución, se establecieron empleando un tercer

mapa. La aplicación de los SIG permitió evaluar los costos para diferentes decisiones, así como observar el efecto de las inundaciones sobre albergues potenciales y caminos.

Simulación a través de esta herramienta se puede experimentar con una situación real y analizar las consecuencias de decisiones como la apertura de un centro de distribución o el uso de cierta ruta para evacuación y transporte. La situación real que se desea simular se modela utilizando software especial para después experimentar sobre el sistema simulado, modificando de manera sistemática una serie de factores críticos que repercuten en su desempeño. Este recurso metodológico resulta valioso para definir un plan de prevención sobre una zona que ya en el pasado resultó afectada y revisar las decisiones tomadas anteriormente. En el contexto de logística humanitaria, la simulación se ha empleado, por ejemplo, para validar planes de evacuación considerando el comportamiento del tráfico para diferentes grados de afectación de la zona.

Las anteriores metodologías pueden utilizarse en combinación para ampliar su alcance o hacer un estudio más detallado de posibles escenarios. La metodología híbrida más común es el uso de Sistemas Geográficos, ya sea combinado con simulación o con programación matemática. La información del análisis de una zona geográfica aportado por el SIG se usa como entrada para las otras metodologías. Autores como Stepanov y MacGregor (2008) usaron esta estrategia para diseñar algoritmos y definir rutas de evacuación, de tal manera que se minimice el tiempo en que los habitantes salen de la zona de peligro. El modelo de optimización propuesto define las rutas de origen-destino, en tanto que el SIG ayuda a evaluar la congestión por tráfico en las rutas candidatas y decidir qué ruta es más conveniente bajo distintas condiciones. Cuando el flujo vehicular era excesivo, se consideraron rutas alternas. Otro estudio donde se utilizó más de un método fue el de Chang *et. al.* (2007), que propuso un modelo de optimización de dos etapas en caso de inundaciones. En la primera etapa se agruparon las áreas de rescate y se clasificaron dependiendo del nivel de emergencia para la zona, minimizando la distancia de los centros de distribución a las áreas. En una segunda etapa se determinaron las instalaciones candidatas a centros de distribución, en las cuales se ubicaría equipo de rescate en inventario. Diferentes escenarios de niveles de lluvia fueron analizados con el apoyo de Sistemas de Información Geográfica. Por su parte Han *et al.* (2006) construyeron un modelo de optimización que, en caso de inundación, selecciona las rutas de evacuación y el destino de las personas. Los resultados del modelo de optimización se usaron para simular cambios de ruta y destinos; el análisis del flujo del tráfico durante 20 horas de evacuación permitió restringir el número de rutas y destinos para así reducir el tiempo total de evacuación.

Los criterios de desempeño de logística humanitaria son muy diferentes a los de logística tradicional; en particular, el criterio de costo que domina las decisiones de la logística empresarial no es tan relevante. Entre los criterios usados en logística de desastres están: el tiempo que lleva el evacuar a todas las personas damnificadas de la zona, la seguridad de las rutas utilizadas, el tiempo de exposición al evento para quienes aún no han sido evacuados, la equidad en la distribución de ayuda y el tiempo de entrega de apoyos a la población. Dada esta variedad en criterios, es frecuente considerar múltiples objetivos en el modelo de optimización; en este caso normalmente no existe una solución que optimice de forma simultánea todos los diferentes criterios, ya que éstos suelen estar en conflicto, esto es, no es posible mejorar un objetivo (ejemplo, tiempo de evacuación) sin detrimento de otros objetivos (ejemplo costo). Por lo cual, para resolver el modelo habrá que utilizar métodos multi-objetivo o bien separar los objetivos y formular y resolver el problema en varias etapas. Kongsomsaksakul *et al.* (2005) aplicaron esta última estrategia para resolver de forma separada dos problemas interdependientes entre sí: 1) especificar el número y ubicación de albergues y 2) establecer rutas hacia los albergues determinados en la primera etapa. El modelo propuesto minimiza el tiempo total de evacuación y elige aquellos albergues con la mejor ubicación. El modelo asume que cada persona que sale del área afectada elige el albergue y la ruta; también se asumen medios de transporte (automóviles)

de un mismo tipo, así como los límites de capacidad y velocidad en las rutas de evacuación.

La solución al problema de optimización multi-objetivo se puede obtener a partir de la construcción de la frontera Pareto o conjunto de mejores soluciones, en el sentido de que no están dominadas por otras soluciones; es decir, no se puede lograr una mejora en un criterio sin que otro(s) empeore. Construir esta frontera resulta más complicado entre más objetivos se propongan, para más de tres objetivos el problema es ya en extremo difícil (Vitoriano *et al.*, 2010). Entre los métodos que se pueden utilizar para construir la frontera Pareto están:

1. Métodos basados en la combinación de objetivos, como el de la suma ponderada que optimiza la suma de los varios objetivos ponderados, cada uno por un coeficiente o peso proporcional a la importancia relativa del criterio.
2. Método de la e-restricción, en el cual uno de los criterios se especifica como el más importante, mientras que para los otros se definen valores deseables o niveles de aspiración que se supeditan al criterio principal.
3. Algoritmos heurísticos, que resultan especialmente atractivos para resolver problemas complejos, si bien no resultan tan simples de implementar como los métodos anteriores.

Mejía-Argueta (2013) proporciona una revisión de los trabajos en logística de desastres que han utilizado el enfoque multicriterio. En la tabla 1 se presenta un resumen de esta revisión, la cual se ha complementado con referencias más recientes (2011 a la fecha). En la tabla se indica el tipo de algoritmo o metodología empleado para resolver la problemática planteada; cabe hacer notar que en la mayoría de los casos en que se generaron soluciones eficientes se hizo uso de algún algoritmo heurístico, esto debido a la complejidad de resolver el problema de optimización formulado.

Tabla 1. Modelos multi-criterio para la planeación de actividades de logística humanitaria

Autores	Objetivos considerados y estrategia de solución	Descripción del problema que se resuelve
Barbarosoglu <i>et al.</i> (2002) citado por Mejias	Tiempo y costo. Aplican un método multi-criterio interactivo para evaluar continuamente las soluciones no dominadas y filtrar la frontera eficiente según niveles de aspiración del grupo decisor.	Propuesta en dos fases para operaciones de desastre asistidas por helicóptero: Fase Táctica: Número de helicópteros y tripulación. Fase Operativa: Definición de rutas, para evacuación y entrega de ayuda en zonas afectadas bajo restricciones de itinerarios, transbordos y capacidad.
Özdamar <i>et al.</i> (2004)	Demanda insatisfecha. Modelo de flujo en redes multi-periodo.	Distribución de diversos artículos desde los centros de acopio a los de distribución ubicados en las zonas afectadas.
Altıparmak <i>et al.</i> (2006)	Costo, satisfacción de la demanda, desviación en el uso de la capacidad de instalaciones. Algoritmos genéticos.	Diseño de una red de suministro en Turquía considerando restricciones varias para el transporte de productos.

Drezner <i>et al.</i> (2006)	Distancia de recorrido y equidad en la atención o distribución de ayuda. Búsqueda Tabú.	Localización de puntos para la recogida de heridos en Orange County, CA.
Durán <i>et al.</i> (2007)	Tiempo de respuesta dado un presupuesto fijo. Modelo entero mixto de localización e inventario.	Localización de almacenes y determinación de la cantidad de inventario pre-posicionado para 48 productos que cubren necesidades básicas de una población afectada.
Balcik <i>et al.</i> (2008)	Demanda satisfecha y costo total. Modelación en dos fases: 1) Rutas por vehículo y 2) Uso de programación entera para definir períodos de entrega y cantidades.	Determinación del itinerario de entrega de suministros (período en que se visita cada punto de demanda, cantidades a entregar, cargas de los vehículos y rutas de entrega).
Doerner <i>et al.</i> (2009)	Costo, riesgo, cobertura y equidad. Algoritmo genético.	Localización de instalaciones y definición de rutas para distribuir ayuda en caso de tsunamis en Sri Lanka.
Nolz <i>et al.</i> (2010)	Distancia entre población y puntos de distribución, equidad, cobertura y costo. Algoritmo memético especial.	Distribución de agua potable durante emergencia considerando cobertura en área afectada.
Yuan y Wang (2009)	Tiempo de evacuación y características de la ruta. Colonia de hormigas.	Diseño de rutas para la evacuación considerando daños provocados en rutas e información en tiempo real.
Vitoriano <i>et al.</i> (2010)	Costo del plan de distribución, tiempo de duración de las operaciones, equidad en la distribución, proporción de la demanda satisfecha en cada punto, confiabilidad de las operaciones y seguridad Programación por metas	Diseño de rutas para vehículos y selección del tipo de vehículos para distribuir una cantidad fija de ayuda humanitaria en una zona afectada por un desastre natural, caso de aplicación para el terremoto en Haití
Tinguro-Rodríguez <i>et al.</i> (2011)	Número de personas muertas, heridas, damnificadas y que quedaron sin hogar Lógica borrosa	Diseño de un Sistema de Evaluación y Diagnóstico de Desastres (SEDD = System of Evaluation and Diagnostics of Disasters) que pronostica las consecuencias de un desastre con base en información histórica y descripciones verbales de la situación.
Nolz <i>et al.</i> (2011)	Riesgo en el transporte de suministros, cobertura del sistema logístico y tiempo total de viaje Algoritmo memético complementado con un algoritmo específico que genera un mayor número de alternativas Pareto-óptimas	Diseño de un sistema logístico que garantice la distribución adecuada de ayuda después de que ha ocurrido un desastre considerando los daños a la infraestructura en el área que puedan afectar la distribución de suministros.

<p>Liberatore <i>et al.</i> (2012)</p>	<p>Seguridad de las vías de transporte, total de personas asistidas Modelo jerárquico RechADS que asigna prioridades de ayuda de tal manera que se logre la máxima cobertura (mayor número de personas asistidas). Se enlazan las actividades de distribución con las de recuperación</p>	<p>Distribución de suministros a la población afectada por un desastre natural -el caso de aplicación es para el terremoto de Haití- considerando que la infraestructura de comunicación está afectada por lo cual no todos los vehículos pueden ir desde (hacia) los centros de distribución hacia (desde) las zonas afectadas.</p>
--	--	--

Fuente: Adaptado y extendido a partir de Mejía (2013)³

METODOLOGÍA

El primer paso de la metodología consistió en formular un modelo de programación lineal entera (PLE), a partir de la red que se muestra en el diagrama de la figura 1. Los nodos representan a los centros de distribución (identificados por el subíndice j), los albergues (simbolizados por el subíndice k) y AGEB (representados por el subíndice g). Los centros de distribución abastecen a los albergues con la cantidad de kits necesaria para cubrir la demanda dependiendo del número de personas que llegan a los albergues provenientes de las AGEB inundadas.

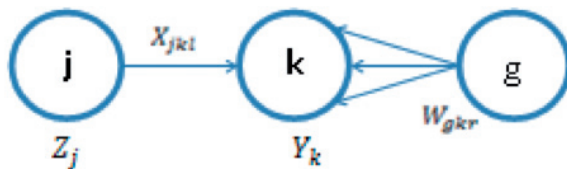


Figura 1. Representación del modelo de optimización como un gráfico de red

El modelo construido considera dos criterios, expresados en las siguientes funciones objetivo: (1) costo total que incluye el costo de apertura/acondicionamiento de albergues y centros de distribución, costo de aprovisionamiento (costo por inventario pre-posicionado y de envío del centro de distribución al albergue), más el costo por transporte, ya sea para evacuar damnificados o trasladar kits de ayuda a los albergues y (2) tiempo total para desalojar a todos los individuos afectados; las funciones correspondientes se dan a continuación:

Los parámetros utilizados en las funciones anteriores son:

$$\text{Min} \sum_j \sum_k F_j \varphi_j + \sum_j \sum_k C_{jk} \sum_l X_{jkl} \text{vol}_l + \sum_g \sum_k \sum_m Q_{gmk} W_{gmk} + \sum_j \sum_k \sum_l X_{jkl} V_l + \sum_k Y_k A_k \quad (1)$$

$$\text{Min} \sum_g \sum_k \sum_m W_{gmk} T_{gmk} \quad (2)$$

³ Las referencias citadas por Mejía (2013) no fueron revisadas directamente por los autores de este trabajo; la referencia completa para los trabajos citados en la tabla hasta el 2010 puede consultarse en el trabajo original de donde fueron extraídas.

F_j : Costo fijo por abrir el centro de distribución $j, j \in J$

C_{jk} : Costo por enviar una tonelada desde el centro de distribución $j, j \in J$ al albergue $k \in K$

Q_{gmk} : Costo por transportar una persona en el modo $m \in M$ desde la AGEB $g \in G$ al albergue

V_l : Costo de adquisición del producto $l \in L$

h_l : Costo por almacenar el producto $l \in L$ por 15 días en los centros de distribución

A_k : Costo por abrir y habilitar el albergue $k \in K$

T_{gmk} : Tiempo de traslado esperado desde la AGEB $g \in G$ hasta el albergue $k \in K$ a través del modo $m \in M$

vol_l : Volumen del producto $l \in L$ en m^3

μ : una constante positiva muy grande

Mientras que las variables de decisión son:

W_{gmk} : Cantidad de personas que se desplazan desde la AGEB $g \in G$ hasta el albergue $k \in K$ a través del modo $m \in M$ donde $m = 1$ automóvil, $m = 2$ camión y $m = 3$ helicóptero.

X_{jkl} : Cantidad de cajas del producto $l \in L$ a ser enviada desde el centro de distribución $j \in J$ al albergue $k \in K$

Las restricciones impuestas al modelo son:

$$Y_k = \begin{cases} 1, & \text{si el albergue } k \in K \text{ se abre} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$\varphi_j = \begin{cases} 1, & \text{si el centro de distribución } j \in J \text{ se abre} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$M_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{si el centro de distribución } j \in J \text{ atiende al albergue } k \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

La descripción del anterior grupo de restricciones es como sigue:

$$\sum_k^K \sum_l^L vol_l X_{jkl} \leq K_j \varphi_j \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_k^K \sum_l^L vol_l X_{jkl} \geq \gamma K_j \varphi_j \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$\sum_g^G \sum_m^M W_{gmk} \leq S_k Y_k \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_g^G \sum_m^M W_{gmk} \geq \beta \cdot S_k Y_k \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_k^K A_k Y_k + \sum_j^J \sum_k^K F_j \varphi_j + \sum_j^J \sum_k^K \sum_l^L V_l X_{jkl} \leq B_0 \quad (7)$$

$$\sum_j^J \sum_k^K C_{jk} \sum_l^L X_{jkl} vol_l + \sum_g^G \sum_k^K \sum_m^M Q_{gmk} W_{gmk} + \sum_j^J \sum_k^K \sum_l^L X_{jkl} h_l \leq B_1 \quad (8)$$

$$\sum_k^K \sum_m^M W_{gmk} = P_g \quad \forall g \in G \quad (9)$$

$$\sum_m^M \sum_g^G W_{gmk} \leq \alpha_l \sum_j^J X_{jkl} \quad \forall k \in K, l \in L \quad (10)$$

$$\sum_j^J M_{jk} \leq Y_k \quad \forall k \in K \quad (11)$$

$$\sum_g^G \sum_k^K W_{g1k} \leq \delta \sum_g^G P_g \quad (12)$$

$$\sum_l^L X_{jkl} \leq M_{jk} \mu \quad \forall k \in K, j \in J \quad (13)$$

$$W_{gmk} \geq 0 \text{ entera} \quad \forall g \in G, k \in K, m \in M \quad (14)$$

$$X_{jkl} \geq 0 \text{ entera} \quad \forall j \in J, k \in K, l \in L \quad (15)$$

$$\varphi_j, Y_k, M_{jk} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, k \in K \quad (16)$$

(3) La cantidad de suministros que se envía de los centros de distribución a los albergues no excede la capacidad de los centros

(4) No se abre un centro de distribución a menos que se distribuya la cantidad equivalente al diez por ciento de su capacidad

(5) La demanda de un albergue (individuos enviados desde cada AGE) no excede su capacidad

(6) Una instalación se acepta como albergue solo si el número de personas que lo utilizan corresponde al menos al diez por ciento de su capacidad

(7) El acondicionamiento de instalaciones (limpieza y adquisición de diversos paquetes de asistencia) no debe exceder el presupuesto preventivo disponible

(8) Los gastos de transporte de insumos y de evacuación de individuos no excede el presupuesto asignado para situaciones de emergencia

(9) Todos los residentes de los distintos AGEB afectados se trasladan a algún albergue

(10) Se garantiza que a cada albergue se le abastece el número de kits⁴ de ayuda necesarios para que la población pueda sobrevivir por cuatro días, que es el período crítico de emergencia definido por Protección Civil. Para formular esta ecuación se aplica una transformación que considera que cada kit personal (aseo, abrigo y despensa) cubre los requerimientos de cuatro personas, y cada kit de medicinas el de 100 personas

(11) Cada albergue recibe suministros de un único centro de distribución

(12) Esta restricción toma en cuenta que alrededor de un 40% de las personas sale de la zona afectada en su propio automóvil (Astudillo, 2011), mientras el resto de la población es evacuada por autobús o helicóptero

(13) Se garantiza que se envía suministro de ayuda a un albergue desde un centro de distribución sólo si éste se abre

Las ecuaciones (14) a (16) corresponden a las restricciones de no-negatividad y aquellas que especifican cuáles variables son enteras y cuáles binarias.

El plan de prevención que resulta de resolver el modelo propuesto asume lo siguiente:

- El plan de prevención aplica para cuatro días de emergencia; posteriormente, la responsabilidad de la colocación de los insumos en los albergues pasa a manos de la Secretaría de la Defensa Nacional [SEDENA] o el Sistema Nacional de Protección Civil [SINAPROC] dependiendo de la magnitud del evento.
- Los insumos están pre-posicionados en los centros de distribución que mantiene el SINAPROC, en previsión del inicio de la temporada de inundaciones.
- Los insumos se transportan por medio de vehículos propiedad de protección civil, y cuya capacidad (17 m³) se utilizó para calcular el costo de movilizar los insumos desde los centros de distribución hacia los albergues.
- No hay restricciones en la cantidad de camiones necesarios para transportar a las personas hacia los albergues, debido a que si ocurre una emergencia o desastre, el gobierno puede hacer uso de los recursos del transporte público disponibles en la zona.
- Las rutas de evacuación se definen para cada par origen- destino, donde los orígenes corresponden a los centroides de la AGEB y los destinos a los albergues, en estas rutas se puede transitar empleando cualquiera de los tres modos de transporte.

⁴ Los kits de ayuda incluyen productos de aseo personal, limpieza, abrigo y despensas para una familia de cuatro personas además de un kit adicional de medicinas para atender a cien personas (kits de medicina). El contenido de estos kits está definido por las autoridades mexicanas y son distribuidos a través del Sistema de Distribuidoras Conasupo (DICONSA). Para estimar el número de kits necesarios por albergue abierto se utilizó una transformación que consiste en multiplicar la cantidad de cajas necesarias por el factor de conversión correspondiente, esto es 4 o 100 personas dependiendo de si se trata de un kits familiar de alimentos/bebidas o uno de medicamentos.

- Las personas afectadas en cada AGEB están informadas sobre cuál albergue les corresponde. Según la gravedad de la inundación, la cual depende del tirante de inundación, se informará a la población mediante un código de colores a cuál albergue trasladarse. Se usa color amarillo para representar la inundación de 80 centímetros, naranja para dos metros y rojo para cuatro metros.

La segunda parte de la metodología consistió en un análisis para la zona con el apoyo del Sistema de Información Geográfico ArcView. A partir de este análisis se determinaron aquellas instalaciones que pueden usarse como albergue para tres diferentes tirantes de inundación (80 cm, 2 y 4 m. El primero corresponde a la altura de una mesa, el segundo la altura de una casa de un nivel y el tercero corresponde a una casa de dos niveles; este último tirante representa un caso de inundación severa como el registrado en Tabasco en el 2007. El análisis también permitió identificar aquellas AGEB que podrían inundarse, así como el número de residentes por AGEB que resultarían afectados. Este análisis se realizó empleando diferentes mapas de información que, a través de operaciones de intersección, permitieron producir nuevos mapas con la información necesaria para definir los parámetros de entrada del modelo de optimización, tales como capacidad requerida en los albergues o el número de kits de ayuda.

La primera actividad realizada empleando el SIG fue ubicar aquellas instalaciones que cubrían los requisitos de seguridad para ser usados como albergues o centros de distribución. Para los albergues se seleccionaron principalmente escuelas, iglesias, hoteles y oficinas de gobierno, mientras que para centros de distribución se eligieron edificios públicos y bodegas, ya que estas instalaciones deben contar con capacidad para almacenaje y maniobras de carga y descarga. Para definir los sitios potenciales que pueden ser acondicionados como albergues se aplicaron los criterios especificados por la Cruz Roja, SEDENA y el Centro Nacional de Prevención de Desastres [CENAPRED] (2009), entre los que destacan el ser instalaciones ubicadas en lugares con bajo grado de vulnerabilidad y de fácil acceso, contar con servicios básicos (agua, luz y drenaje), servicios sanitarios y espacio suficiente (3.5 m² por persona) para albergar a un alto número de personas. Al igual que con los albergues, las imágenes satelitales permitieron la identificación de sitios potenciales para establecer centros de distribución, entre los que figuraron las bodegas DICONSA y de la Secretaría de Desarrollo Social [SEDESOL]. El total de sitios candidatos varía dependiendo de la severidad de la inundación, esto es, del tirante del agua.

El SIG y el software geográfico se usaron también para identificar aquellas vías de comunicación (calles y carreteras) que podían emplearse para realizar la evacuación. Fue además necesario emplear mapas donde se muestran las AGEB de la ciudad de Villahermosa. A partir de ellos se calculó el área que podría resultar inundada para cada tirante de inundación y el número de habitantes afectados. Además, se localizaron los centroides, que son los puntos de origen desde donde se propone van a moverse los individuos hacia los albergues. Para determinar el número de individuos afectados bajo cada escenario se calcularon intervalos para el área inundada por AGEB y, a partir de ellos, se estimó el porcentaje de la población total de la AGEB que tendría que ser evacuada tomando como referencia la información reportada en la página Web de Protección Civil del estado de Tabasco. Los intervalos que se establecieron y la proporción de población afectada para cada uno de ellos se reportan en la tabla 2.

Tabla 2. Fracción de la población afectada según el porcentaje del área inundada

Área inundada	Porcentaje de población afectada
$\geq 80\%$	100%
$\geq 50\%$	50%
$\geq 10\%$	25%
$\geq 1\%$	Proporcional al tamaño

Para definir la capa de los tirantes de inundación se creó un archivo *roster* con apoyo del programa Idrisi, cuya finalidad fue simular las varias alturas o tirantes de inundación tomando en cuenta la elevación que tiene la zona de estudio. Esto fue posible mediante la operación sobreposición y multiplicación del mapa de elevación (United States Geological Survey, 2007) y el mapa con la altura del tirante de inundación. Una vez obtenido el mapa de inundación, se exportó a ArcView y se realizó una intersección de éste con cada uno de los mapas antes descritos (instalaciones, AGEB y red vial) con el propósito de definir cuáles albergues y vías de comunicación no resultaban inundadas para cada tirante de inundación y por tanto eran viables de utilizar.

La tercera fase de la metodología fue la estimación de los costos para todas las actividades del plan de emergencia. Los costos fueron calculados empleando información de diferentes fuentes. Por ejemplo, la empresa Limpieza Total México proporcionó una cotización para el servicio de limpieza de \$ 6000 para una instalación de 1000 m². a partir de la cual se estimó el costo de limpieza de los sitios propuestos como albergues potenciales. Los costos de apertura/ acondicionamiento de un albergue y de los kits de alimentos autorizados por Gobernación y Protección Civil fueron determinados a partir de los informes de la Comisión Económica para América Latina (CEPAL, 2008). Los costos del transporte se calcularon con base al costo de moverse de una AGEB a cualquiera de los albergues disponibles; para ello se determinaron todas las distancias para cada par AGEB-albergue a través del software transcad® empleando la red vial de Villahermosa. Esto se hizo para cada escenario, puesto que el número de AGEB y albergues varía bajo cada situación. Se utilizó el algoritmo Floyd-Warshall para asegurar que las distancias obtenidas fueran las menores posibles; a partir de estas distancias se determinó el costo de utilización para los tres modos de transporte (automóvil, camión o helicóptero) multiplicando la distancia a recorrer por el precio del combustible usado por cada tipo de vehículo.

La última etapa de la metodología consistió en resolver el problema de optimización bi-criterio empleando el método de las ponderaciones y complementado con el de la ϵ -restricción. A cada escenario o altura del tirante de inundación corresponde un modelo de PLE mixto, ya que el número de albergues y centros de distribución potenciales y de AGEB inundados varía con cada escenario. Los modelos fueron resueltos mediante el uso del Sistema General de Modelaje Algebraico (GAMS®) utilizando el solver CPLEX, y se corrieron en una computadora de dos procesadores y con 25 GB de memoria RAM. La solución a cada modelo permitió establecer: el número de personas a ser evacuadas desde los distintos AGEB hacia los albergues mediante diferentes medios de transporte (automóvil, autobús y helicóptero); el número y ubicación de albergues y centros de distribución que se requiere habilitar bajo cada escenario de inundación; la demanda de los diferentes medios de transporte y las rutas a utilizar y el número de viajes requeridos para abastecer de insumos a los albergues y evacuar a la población.

RESULTADOS

La construcción de la frontera Pareto se inició con la determinación de los puntos ideales, los cuales se obtienen al resolver los modelos de PLE mixta minimizando por separado cada uno de los dos objetivos: tiempo total de evacuación y costo. Posteriormente se generaron soluciones de la frontera Pareto óptima utilizando la técnica de los pesos (Steuer, 1986), la cual consiste en construir combinaciones convexas de ambos objetivos normalizados para formar una función a la cual se pueden aplicar métodos de optimización estándar. Los pesos asignados a cada objetivo en la combinación convexa se indican en la tabla 4 y fueron elegidos en incrementos de 0.05 con la intención de cubrir toda la frontera de Pareto. Las funciones objetivo fueron normalizadas dividiendo cada una de ellas entre su valor ideal para evitar problemas de escala.

Una vez que se aplicó la técnica de los pesos y con la intención de garantizar que se obtuvieran la mayoría de los puntos de la frontera Pareto, se hizo uso de la técnica de la ϵ -restricción (Steuer, 1986), la cual consiste en optimizar un objetivo e imponer como restricción el otro, asociándole un umbral propuesto por el analista. Este umbral se elige dentro del intervalo definido por el valor ideal de la función y el valor máximo que puede tomar la función en la frontera; a partir de una serie de modificaciones al umbral es como se obtienen los puntos de la frontera. El uso combinado de ambas técnicas permite obtener la mayoría de los puntos de la frontera Pareto sin recurrir a algoritmos especializados para problemas multicriterio. En la tabla 3 se reportan las soluciones obtenidas para el escenario de un tirante de 80 cm; las soluciones para los otros dos escenarios son similares y sus detalles pueden ser consultados en el trabajo reportado por Enríquez-Colón (2012).

En el primer renglón de la tabla 3 se indica el número del albergue que se va a acondicionar; la primera columna identifica el número de AGEB de donde es necesario evacuar individuos, mientras que las entradas de la segunda columna de la tabla especifican el modo de transporte (1 = automóvil, 2 = camión y 3 = helicóptero) a utilizar. Las entradas en las celdas corresponden al número de personas que hay que trasladar de cada AGEB a cada albergue. Por ejemplo, de la AGEB cuatro hay que trasladar a 92 personas (cantidad marcada dentro de un círculo) hacia el albergue 37, empleando el modo de transporte 2 = camión.

Tabla 3. Número de personas a transportar de cada AGEB (origen) a cada albergue (destino)

	MODO	ALBERGUE ASIGNADO								
AGEB		9	14	37	58	60	61	63	93	100
1	2	0	0	211	128	0	0	0	0	0
1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	0	277	0	0	0
2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	2	0	0	92	0	0	0	0	0	0
4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	324
5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	2	0	0	0	0	0	0	52	0	0

Fuente: Enríquez-Colón (2012).

Especificación de rutas de evacuación

La ruta a seguir para transportar a los damnificados se definió a partir de la matriz de asignación correspondiente (Tabla 3) y de la aplicación del algoritmo Floyd-Warshall, apoyándose con el mapa de la red vial de la ciudad. Por ejemplo, el traslado de personas del AGEB 4 al albergue 37 no se hace por una ruta directa, sino que la ruta queda definida por varios segmentos que corresponden a la distancia más corta considerando todos los posibles nodos de la red bajo cada escenario, esto es, distancias ya sea entre dos AGEB, dos albergues o entre un AGEB y un albergue. Para el ejemplo citado, la ruta a seguir es la siguiente, (cabe aclarar que no se hacen necesariamente paradas en los albergues intermedios, éstos solo definen los puntos de la ruta a recorrer):

AGEB 4- Albergue 79- Albergue 60- Albergue 156- Albergue 37

Generación de soluciones en la frontera Pareto

Para resolver el problema de PLE mixto bi-criterio se propusieron diferentes pesos para los criterios. En la tabla 4 se reportan algunas de estas soluciones, a partir de las cuales los responsables de la implementación del plan de emergencia en caso de inundación, podrán ajustar su presupuesto para asegurarse de evacuar a la población en un tiempo razonable. Por ejemplo, para la combinación de pesos {0.65, 0.35} (marcado en negritas en la tabla), el costo del plan de ayuda resultó ser 1.920.336 USD (equivalente a \$ 24.964.370 pesos mexicanos para una tasa de cambio aplicada de 13 pesos por dólar) con un tiempo total de viajes para completar la evacuación igual a 63.033 minutos.

Tabla 4. Puntos en la frontera Pareto para el escenario de un tirante de inundación de 80 cm

Peso 1	Peso 2	Costo (USD)	Tiempo	Peso 1	Peso 2	Costo (USD)	Tiempo
0.05	0.95	2085227.7	63168	0.55	0.45	1919566.2	63038
0.10	0.90	1977023.8	62912	0.60	0.40	1915777.7	63167
0.15	0.85	1961714.6	62914	0.65	0.35	1920336.2	63033
0.20	0.80	1940687.7	62934	0.70	0.30	1920226.9	63431
0.25	0.75	1944600.8	62912	0.75	0.25	1920736.2	63485
0.30	0.70	1926384.6	62913	0.80	0.20	1913408.5	63944
0.35	0.65	1927325.4	62940	0.85	0.15	1887331.5	68526
0.40	0.60	1924234.6	63142	0.90	0.10	1873568.5	71176
0.45	0.55	1928748.5	62938	0.95	0.05	1834001.5	87077
0.50	0.50	1929529.2	63169				

Fuente: Enríquez-Colón (2012).

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Optimización de objetivos por separado

Para el caso de un tirante de agua de 80 cm, el análisis geográfico resultó en 468 sitios elegibles para albergue de un total de 549 sitios identificados como candidatos; 21 sitios elegibles como centros de distribución y 65 AGEB afectados de un total de 96 que conforman la zona urbana de Villahermosa, lo que deriva en la necesidad de evacuar a 37.056 personas. La solución óptima, cuando el único objetivo fue minimizar, el costo, resultó en un plan de emergencia con un costo de \$ 23.656.180 pesos mexicanos (1.819.706 USD) y que requiere de un tiempo total de evacuación de 272.808 minutos. Este tiempo es la suma de la duración del total de viajes necesarios para mover a todas las personas afectadas del AGEB donde residen al albergue

asignado. Por otra parte, la solución óptima, cuando el objetivo fue minimizar el tiempo total de evacuación, resultó en una reducción importante para este criterio, el cual fue igual a 62.489 minutos. Sin embargo, este tiempo mínimo conlleva un incremento considerable en el costo del plan, el cual fue de \$ 40.668.300 pesos mexicanos (aproximadamente 3.128.330 USD) lo que representa un incremento del 72% con respecto al menor costo posible. Estas soluciones ideales sirven como referencia para obtener las soluciones en la frontera Pareto.

La solución del modelo para el caso en que el único criterio a optimizar fue el costo, requiere de acondicionar 11 centros de distribución, más la apertura de 31 albergues con los cuales se logra satisfacer las necesidades de 37 mil personas damnificadas que tienen que ser evacuadas de sus domicilios hacia los albergues. El modelo no únicamente define cuántos albergues abrir, sino que además selecciona cuáles de los sitios potenciales se van a habilitar como albergues, cuáles centros de distribución abastecerán a los albergues abiertos, asigna a las personas afectadas a los albergues y especifica la ruta y el modo de transporte a utilizar buscando reducir los costos de todas estas operaciones.

Mientras que las soluciones ideales, obtenidas al optimizar un único criterio, pueden resultar en un grave deterioro para el otro criterio, las soluciones no-dominadas o en la frontera Pareto representan un "compromiso" respecto a ambos criterios. Por ejemplo, la solución marcada en negritas en la tabla 4 corresponde a un tiempo total de evacuación de 63.033 min. el cual resulta bastante cercano al menor tiempo de evacuación que se puede lograr. El incremento en el valor de este criterio corresponde a un aumento de únicamente 0.87% respecto al tiempo ideal de 62.489 min. pero representa un ahorro significativo, equivalente al 42%, en cuanto al costo del plan. El costo del plan de emergencia que resulta al considerar ambos criterios es únicamente de 1.819.706 USD, en tanto el costo del plan que minimiza el tiempo total de evacuación es igual a 3.128.330 USD.

Varias opciones de solución, de entre aquellas enumeradas en la tabla 4, pueden resultar aceptables para los responsables del plan de emergencia dependiendo de sus preferencias en cuanto a costos o duración total de los viajes necesarios para completar la evacuación. Una vez que un plan ha sido elegido, ya que representa un buen balance entre su costo y el tiempo total de evacuación, la solución al modelo bi-criterio proporciona los detalles de cuántos albergues y centros de distribución hay que abrir, dónde se ubican, cuáles y cuántos AGEB e individuos resultan afectados y a dónde hay que trasladar a los damnificados. Los resultados para cada solución se presentan en el mismo formato que se mostró en el caso en que los criterios se optimizaron por separado. Aquí cabe aclarar que como la ruta de evacuación definida no va directamente del centro de un AGEB hacia el albergue destino, sino que implica pasar por otros AGEB o albergues, se podría aprovechar la posible capacidad en exceso de los vehículos para trasladar a los residentes asignados a un mismo albergue. Sin embargo, esta opción no fue considerada en el modelo de optimización bi-criterio planteado, asumiéndose que distintos vehículos realizarán el traslado de los damnificados desde cada AGEB hacia el albergue asignado, aún cuando el albergue destino sea el mismo para los residentes de varias AGEB.

El último escenario considerado en esta investigación correspondió al tirante de inundación de cuatro metros. Este escenario según se indicó previamente, equivale a un nivel de inundación tan severo como el registrado en el 2007 en la ciudad de Villahermosa. El análisis geográfico para este escenario resultó en un total de 225 sitios, que requieren ser habilitados como albergues, con una capacidad conjunta para atender a 158.948 personas. Se identificaron además catorce sitios que pueden acondicionarse como centros de distribución, ya que estas instalaciones no resultarían afectadas en caso de una inundación así de severa. Resolver los modelos de optimización asociados a este escenario representó mayores dificultades, el obtener una solución de la frontera Pareto llevó hasta diez horas de procesamiento. Los puntos

de la frontera generados para varias combinaciones de pesos para este escenario de alta severidad se muestran en la figura 2.

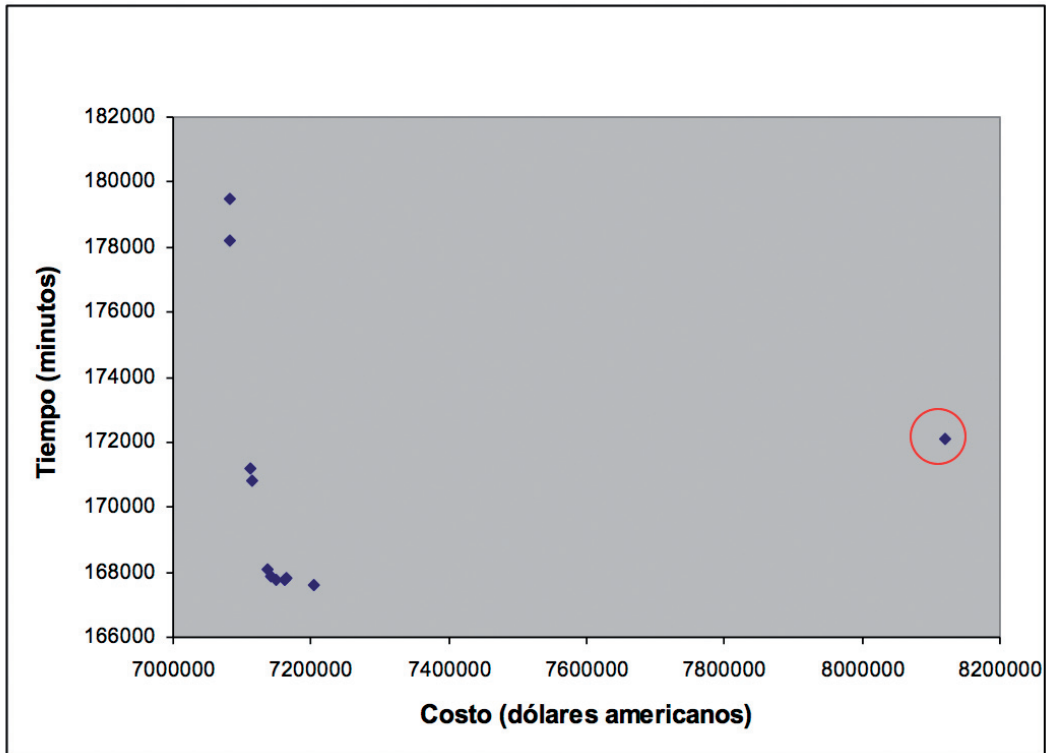


Figura 2. Soluciones de la frontera Pareto para el escenario de un tirante de inundación de cuatro metros.

El punto enmarcado en un círculo corresponde al costo y tiempo total de evacuación del plan de emergencia que las autoridades utilizaron para dar apoyo a la población de Villahermosa, afectada por la citada inundación del 2007. La relatoría de hechos para este evento, más los reportes de la CEPAL (CEPAL, s.f.), el Fondo de Desastres Naturales y Protección Civil fueron las fuentes empleadas para estimar el costo y tiempo del plan de emergencia aplicado. Como puede apreciarse del gráfico en la figura 2, el punto que corresponde al plan implementado en el 2007 no está sobre la frontera Pareto, lo que implica que está dominado por otros puntos que representan mejores soluciones, en el sentido de que para el costo del plan implementado, que fue de \$ 105.550.000 pesos mexicanos (aproximadamente 8.119.230 USD), se podría reducir aún más el tiempo total de evacuación, o bien el costo del plan podría decrecerse y aún así lograr el tiempo total de evacuación de 172.100 min. que se registró para la inundación sufrida en Villahermosa durante el 2007.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Diversos eventos hidrometeorológicos afectan a distintas regiones de México de manera recurrente, por lo cual es necesario contar con planes de prevención que permitan atender efectivamente a la población afectada. En este trabajo se formuló y resolvió un modelo de programación lineal entera mixta con dos criterios, costo y tiempo total para la evacuación, que

permite simultáneamente: definir el número y localización de albergues y centros de distribución, establecer cuáles centros de distribución abastecerán a qué albergues, asignar individuos a albergues y especificar rutas y tipos de vehículos a utilizar durante la evacuación.

Tres diferentes escenarios de inundación que corresponden a tirantes de inundación de 80 centímetros, dos metros y cuatro metros en la ciudad de Villahermosa, Tabasco, fueron considerados. Las entradas para el modelo de optimización fueron generadas a partir de un análisis geográfico empleando Sistemas de Información Geográfica y software geográfico, que permite la sobreposición de mapas para ubicar sitios seguros que puedan acondicionarse como albergues, así como rutas viables para movilizar a la población afectada y para trasladar los suministros requeridos desde los centros de distribución hacia los albergues. Empleando el método de las ponderaciones y complementado con la técnica de la ϵ - restricción se generaron soluciones de la frontera Pareto eficiente, las cuales corresponden a distintas estrategias de prevención en las cuales se busca alcanzar un compromiso entre el costo de implementación del plan y la duración total de los viajes requeridos para evacuar a todos los habitantes que residen en las AGEB que resultarían inundadas. Las soluciones generadas para el tirante de inundación de cuatro metros indican que es posible mejorar el plan implementado por las autoridades durante la inundación más severa registrada en Villahermosa, la cual ocurrió en el 2007. Esto apoya la validez del modelo sugerido y abre la opción para mejorar los planes de emergencia ante desastres a través de la optimización multi-criterio.

REFERENCIAS

ASTUDILLO, O. L. Metodología para la ubicación de albergues y rutas de evacuación de la población para zonas de riesgo de inundación y una aplicación a un caso en México". Director: Juan Gaytán Iniestra. Tesis de Maestría. Toluca, Méx.: Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, Maestría en Ingeniería con área terminal en Transporte. 2011.

BALACIK, B.; BEAMON, B. Facility location in humanitarian relief. *International Journal of Logistics*, 2008, vol.11, no. 2, pp. 101-121.

BEAMON, B. Humanitarian relief chains: issues and challenges. En *Proceedings of 34th International Conference on Computers & Industrial Engineering* (34°: 14-16-2008. San Francisco, California, USA)

CENAPRED. Centro Nacional de Prevención de Desastres. *Administración y abastecimiento de refugios temporales y atención a damnificados*. [en línea]. 2011. [Fecha consulta 10 septiembre 2011]. Disponible en: http://www.cenapred.gob.mx/es/Capacitacion/PERE/multimedia/docsMultimedia/7_REFUGIOS_TEMPORALES_WEB/7Presentacion_Refugios_Temporales_FT87.pdf.

CEPAL. Centro Económico para América Latina. Tabasco: características e impacto socioeconómico de las inundaciones provocadas a finales de octubre y a comienzos de noviembre de 2007 por el frente frío número 4. [en línea]. 2008. [Fecha consulta 24 junio 2011]. Disponible en: <http://www.eclac.cl/cgi-bin/getProd.asp?xml=/publicaciones/xml/3/33373/P33373.xml&xsl=/mexico/tpl/p9f.xsl>.

CEPAL. Centro Económico para América Latina. *Reseña del impacto de los principales desastres*. [en línea]. [Fecha consulta 02 octubre 2011]. Disponible en: <http://www.eclac.cl/mexico/publicaciones/sinsigla/xml/5/8385/doc4.pdf>.

CHANG, M. S; TSENG, L; CHEN, J. W. A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2000, pp. 737-754.

DALAL, J; MOHAPATRA, P. K. Locating cyclone shelters: a case. *Disaster Prevention and Management*, 2007, vol. 16, no. 2, pp. 235-244.

ENRÍQUEZ-COLÓN, R. A. Diseño de un plan preventivo de evacuación considerando la ubicación de centros de distribución y albergues. Caso Villahermosa. Tesis de Maestría, Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Industrial. Toluca, Méx.: Tecnológico de Monterrey campus Toluca. 2012.

HAN, L; YUAN, F; CHIN, S. M; HWANG, H. Global optimization of emergency evacuation assignments. *Interfaces*, 2006, vol. 36, no. 6, pp. 502-513.

KLEINDORFER, P. R; SINGHAL, K; VAN WASSENHOVE, L. N. Sustainable operations management. *Production and Operations Management*, 2005, vol. 14, no. 4, 482-492.

KONGSOMSAKSAKUL, S; CHEN, A; YANG, C. 2005. Shelter location-allocation model for flood evacuation planning. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 4237-4252.

LIBERATORE, F; ORTUÑO, M. T; TIRADO, G; VITORIANO, B; SCAP, M. P. A hierarchical compromise model for the joint optimization of recovery operations and distribution of emergency goods. *Computers & Operations Research* [en línea]. 2012, [Fecha consulta 09 abril 2012]. Disponible en: <http://www.science-direct.com/science/article/pii/S0305054812000809>.

MEJÍA A, C. Modelo de optimización y metaheurístico integral del problema de Logística Humanitaria a través de un enfoque multicriterios: Caso de estudio en Villahermosa, Tabasco, México. Tesis de doctorado en Ingeniería Industrial. Toluca, Méx.: Tecnológico de Monterrey campus Toluca. 2012.

NOLZ, P. C; SEMET, F; DOERNER, K. F. Risk approaches for delivering disaster relief supplies. *OR Spectrume*, 2011, vol. 51, pp. 543-569. doi: 10.1007/s00291-011-0258-z.

PRATHUMCHAI, K; SAMARAKOON, L. Application of remote sensing and GIS techniques for flood vulnerability and mitigation planning in Munshiganj District of Bangladesh. [en línea]. 2005, [Fecha consulta 13 octubre 2011]. Disponible en: <http://www.a-a-r-s.org/acrs/proceeding/ACRS2005/Papers/DST3-2.pdf>.

PROTECCIÓN CIVIL DEL ESTADO DE TABASCO. [en línea]. [Fecha consulta 11 noviembre 2010]. Disponible en: http://www.tabasco.gob.mx/noticias/vernotas_sp.php?id=2357.

STEPANOV, A; MAC GREGOR, J. Multi-objective evacuation routing in transportation Networks. *European Journal of Operational Research*, 2008, vol. I, no. 198, pp. 435-446.

STEUER, R. E. Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application. John Wiley & Sons, 1986.

THOMAS, A; MIZUSHIMA, M. Logistics training: necessity or luxury?. *Forced Migration Review*, 2005, vol. 22, pp. 60-61.

TINGUARO-RODRÍGUEZ, J; VITORIANO, B; MONTERO, J; KECMAN, V. A disaster-severity

assessment DSS comparative analysis. *OR Spectrum*, 2011, vol. 33, pp. 451-479. doi: 10.1007/s00291-011-0252-5.

UNITED STATES GEOLOGY SURVEY. *HydroSHEDS*, [en línea]. Actualización: julio 2007. [Fecha consulta 19 septiembre 2011]. Disponible en: <http://gisdata.usgs.gov/website/HydroSHEDS/viewer.php>.

VITORIANO, B; ORTUÑO, M. T; TIRADO, G; MONTERO, J. A multi-criteria optimization model for humanitarian aid distribution. *Journal of Global Optimization*, 2010, vol. 51, pp. 189-208. doi: 10.1007/s10898-010-9603-z.

(Van) WASSENHOVE, L. N. Blackett memorial lecture. Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear, *Journal of the Operational Research Society*, 2006, vol. 57, pp. 475-489.

BIOGRAFÍA AUTORES

Juan Gaytán es Profesor-investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) y profesor Emérito en el Tecnológico de Monterrey Campus Toluca. Ha publicado más de 50 artículos científicos arbitrados o de divulgación y participado como ponente en foros académicos nacionales e internacionales. Sus áreas de investigación incluyen la coordinación de actividades en la cadena de abastecimiento a través de la construcción de modelos de optimización, diseño de cadenas de transporte intermodal, administración de proyectos, optimización multi-objetivos y diseño de planes de ayuda para logística humanitaria. Varios de sus proyectos de investigación han sido patrocinados por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) la UAEM y el Tecnológico de Monterrey. Ha sido director de más de 65 tesis de maestría y 10 de doctorado en el Tecnológico de Monterrey, la Facultad de Ingeniería de la UAEM, la North Carolina State University e Iowa State University. Además de su trabajo académico ha ejercido diferentes funciones académicas y administrativas incluyendo la de Director del Departamento de Ingeniería Industrial y Director de los Posgrados en Ingeniería Industrial en el Tecnológico de Monterrey campus Toluca, y Director de Posgrado en la Facultad de Ingeniería y Coordinador de la Maestría en Análisis de Decisiones en la UAEM.

Pilar Ester Arroyo López es Profesora Titular del Departamento de Ingeniería Industrial de la Escuela de Ingeniería del Tecnológico de Monterrey Campus Toluca y forma parte del Sistema Nacional de Investigadores de México. Su investigación se desarrolla en las áreas de administración de la cadena de suministros, desarrollo de proveedores, emprendimiento y mercadotecnia social enfocada al desarrollo sustentable y la salud. Cuenta con 15 artículos publicados en revistas indizadas como el *Operations and Production Management Journal*, el *Journal of Entrepreneurship and Small Business*, el *Business Process Management Journal* y la *Revista Contaduría y Administración de la UNAM*. Ha participado como expositor en más de 50 congresos académicos con publicación de sus trabajos en las memorias correspondientes y autora de cuatro capítulos en libros de investigación. Es además co-autora de tres libros sobre la práctica de los negocios electrónicos en México, co-autora de dos libros sobre administración de la tecnología, autora de cuatro libros sobre el uso de métodos estadísticos en el área de administración y de seis casos enfocados a la enseñanza de métodos cuantitativos para la toma de decisiones.

Ruth Angélica Enríquez Colón obtuvo la licenciatura en Ingeniería Industrial y la Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Industrial en el Tecnológico de Monterrey campus Toluca donde además trabajó como asistente de investigación. Los proyectos en los que

colaboró como asistente se ubican en las áreas de Sistemas de Información Geográfica, logística de la cadena de suministros y logística humanitaria.