



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

OSCAR LUCERO MOYA

Facultad de Informática y Matemática

Carrera Licenciatura en Matemática

TRABAJO DE DIPLOMA

Un enfoque lineal, difuso y multi-objetivo para la evacuación óptima de personas bajo amenaza de huracanes en la provincia de Holguín

Autor:

Luis Enrique Ramos Fernández

Tutores:

Dr. C. Pavel Novoa Hernández

Lic. Ernesto Parra Inza

Junio, 2015

***Nada en la vida debe ser temido, solamente comprendido.
Ahora es momento de comprender más, para temer menos.***

Marie Curie

DEDICATORIA

A mi mamá y a mi papá, por ser la inspiración, la fuerza, para ser quien soy y a donde voy. Por apoyarme y no dejarme caer en los momentos difíciles, así como hacerme conocer lo hermoso y lo bueno de la vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. C. Pavel Novoa Hernández y al Lic. Ernesto Parra Inza, mis tutores, por las indicaciones y motivaciones.

A mis abuelas y hermanas por ser fuente de fuerza, persistencia y amor.

A todos mis profesores y compañeros de clase porque cada uno me ha enseñado algo, a lo largo de mi carrera, valioso y/o importante para la vida.

A mi novia por enseñarme sobre el amor y la pasión, que sirvió de impulsor para mucho de lo que he logrado.

Un agradecimiento especial a mis amigos, que me ayudaron en situaciones difíciles y estuvieron en los momentos de alegría.

Me gustaría agradecer a los compañeros del Poder Popular Provincial que contribuyeron a la investigación.

A toda mi gran familia por estar siempre ahí.

RESUMEN

La evacuación de personas es un proceso sustantivo dentro de la gestión operativa de desastres. En Cuba, y en especial la provincia de Holguín, dicho proceso incluye el control sistemático de los datos poblacionales de cada municipio, y la confección de un plan de respuesta de acuerdo a diversos criterios. Esto último se realiza tradicionalmente de forma manual, con las correspondientes limitaciones en la toma de decisiones involucradas. En ese sentido, la presente investigación tiene por objetivo resolver mediante un enfoque de programación lineal difusa multi-objetivo (PLDM) el problema de transporte asociado a la evacuación de personas durante la amenaza de huracanes en la provincia de Holguín. El enfoque propuesto permite obtener de manera rápida y eficiente una propuesta de evacuación que facilitaría la toma de decisiones teniendo en cuenta múltiples criterios y la presencia de incertidumbre en los datos. Se han considerado 4 casos de estudios relacionados con posibles escenarios de evacuación de personas en la provincia de Holguín. Los resultados muestran que el enfoque propuesto resulta eficaz y lo suficientemente pertinente para ser aplicado en escenarios reales.

ABSTRACT

The evacuation of people is a crucial process in disaster operation management. In Cuba, and especially in the province of Holguin, such a process involves the control of demographic data of every town, and the confection of a response plan according to several criteria. The latter has been commonly human-made process, leading to important limitations in the involved decision making. In this sense, the present work has a goal, to solve the transportation problem associated to the evacuation of people during the occurrence of a hurricane in the Holguin province, by applying a fuzzy multi-objective linear programming approach. This approach allows for obtaining a flexible and an efficient transportation plan taking into account several criteria and the presence of uncertainty in data. *Four* cases studies have been considered related to people evacuation scenarios in the Holguin province. Results show that the proposed approach is effective and suitable for using in real-world scenarios.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. PRELIMINARES.....	7
1.1 Gestión operativa de desastres	7
1.2 Programación lineal y extensiones multi-objetivo y difusa	11
1.2.1 Programación lineal	11
1.2.2 Programación lineal multi-objetivo	18
1.2.3 Programación lineal difusa.....	21
1.2.4 Programación lineal multi-objetivo difusa	24
1.3 Modelos de evacuación en desastres naturales	25
1.4 Características de la provincia de Holguín.....	27
CAPÍTULO 2. ENFOQUE PROPUESTO	29
2.1 Descripción del problema.....	29
2.2 Enfoque propuesto.....	30
2.3 Solución mediante MATLAB	32
2.4 Casos de estudio	35
CONCLUSIONES.....	38
RECOMENDACIONES	39

BIBLIOGRAFÍA	40
ANEXOS	45

INTRODUCCIÓN

En el mundo antiguo debido a la inexistencia de los planes de protección o su mala calidad, ciudades enteras fueron destruidas (ej. el volcán Vesubio destruyó las ciudades de Pompeya y Herculano en el año 79 D.C.). Aunque hoy el ser humano posee conocimientos y un gran desarrollo tecnológico esto aún no es suficiente para frenar en su totalidad la destrucción que estos fenómenos ocasionan. Si observamos el Anexo 1 podemos confirmar que la ocurrencia de desastres y su mitigación es un tema con un alto impacto para la sociedad.

Responder ante los desastres de manera eficiente no es una tarea fácil, pues los factores que intervienen en estos procesos son numerosos. Por ejemplo, el ambiente post-ayuda en caso de desastre es caótico, existe el pánico público, el transporte se pierde así como la infraestructura de comunicación; el número y la variedad de actores involucrados es alto (donantes, medios de comunicación, gobierno, militares, organizaciones humanitarias, entre otros); además de la falta de recursos suficientes para proveer una respuesta adecuada ante la situación.

Una ayuda humanitaria eficiente pero flexible es un tema clave en caso de desastres, del cual se está hablando con mayor auge en el mundo académico actual (Kóvacs, y otros, 2007) como una extensión de esta, la logística humanitaria es una de las disciplinas más importante dentro del manejo de desastres (Nikbakhsh, y otros, 2011). Uno de los obstáculos más grandes para superar en cadenas de suministro de ayuda humanitaria, es la enorme incertidumbre y los múltiples objetivos en la demanda, los suministros y la siempre existente presión que ejerce el tiempo. La logística humanitaria es un proceso considerado de alto nivel de complejidad pues constituye la parte más costosa de la mitigación de desastres (Wassenhove, 2006).

Por su parte la Defensa Civil es una organización con apoyo gubernamental, que opera en la mayoría de los países, y tiene como objetivo apoyar a las poblaciones que habitan en zonas vulnerables para hacer frente a los desastres naturales. La logística

humanitaria se encarga en la etapa de recuperación de minimizar los efectos del desastre, realizando la búsqueda y rescate de víctimas, y la provisión de víveres y servicios de emergencias.

En el caso de Cuba, la Defensa Civil tiene la misión de proteger a la población y la economía nacional contra los medios de destrucción del enemigo y en los casos de desastres naturales u otros tipos de catástrofes, así como de las consecuencias del deterioro del medio ambiente; comprende además la realización de la logística humanitaria.

Debido a su ubicación geográfica, Cuba posee una alta incidencia de fenómenos meteorológicos, especialmente ciclones tropicales. En específico, la provincia de Holguín no es ajena a estos fenómenos. Ubicada en el oriente de la isla y dividida en 14 municipios, con una población de más de un millón de habitantes, Holguín es la tercera provincia más grande del país en cuanto a extensión con 9300Km². Los elementos antes mencionados dan muestra del complejo trabajo de la Defensa Civil en el territorio.

Para darle cumplimiento a su tarea, la Defensa Civil mantiene un estricto control de las vías de acceso terrestre a una gran cantidad de puntos estratégicos del territorio de Holguín, que le permita realizar las labores logísticas humanitarias. Como consecuencia durante o luego de la crisis toda esta información varía de manera vertiginosa por lo que se hace prácticamente imposible mantener de manera manual la información del estado real de las vías de acceso así como proponer rutas óptimas que minimicen los gastos de recursos y maximicen la ayuda brindada. De esta forma, el procedimiento antes mencionado incurre en gastos excesivos de recursos y requiere de mucho más tiempo para consolidar la información. Por tanto se aprecia que es muy difícil detectar posibles errores, lo que dificulta la toma de decisiones.

En el caso de desastres, como un huracán, uno de los trabajos más importantes de la Defensa Civil es el transporte de la población a zonas de menos riesgo, ejemplo

centros de evacuación. Así, como minimizar el tiempo de este trabajo y el costo que incurre en el mismo. Teniendo en cuenta los anteriores objetivos el escenario para dar respuesta a tal situación se muestra plagado de incertidumbres, aun así, en la literatura revisada no existen investigaciones previas que den respuesta a esta problemática en la provincia Holguín.

Lo anteriormente descrito introduce el siguiente **problema**: ¿cómo planificar de manera óptima la evacuación de personas bajo amenaza de huracanes en la provincia de Holguín, de manera que se tenga en cuenta la incertidumbre de los datos, así como el cumplimiento de los objetivos humanitarios y económicos?

Este problema se enmarca en **objeto de la investigación**: gestión operativa de desastres.

Dada la posibilidad de modelar estos escenarios de decisión como problemas de programación lineal difusa y la necesidad del cumplimiento de múltiples objetivos, la presente investigación se propuso como **objetivo**: resolver mediante un enfoque de programación lineal difusa multi-objetivo (PLDM) el problema de transporte asociado a la evacuación de personas durante la amenaza de huracanes en la provincia de Holguín.

El objetivo delimita el siguiente **campo de acción**: programación lineal difusa multi-objetivo en problemas de transporte.

Para guiar la investigación se plantean las siguientes **preguntas científicas**:

- ¿Qué es la gestión operativa de desastres?
- ¿Cuáles son los fundamentos de la programación lineal difusa multi-objetivo?
- ¿Qué modelos de evacuación existen actualmente?
- ¿Qué características de la provincia de Holguín son relevantes para el plan de evacuación?

- ¿Cómo modelar matemáticamente y de manera realista, el problema de la evacuación óptima de personas bajo amenaza de huracanes, en la provincia de Holguín?
- ¿Cómo resolver eficientemente este modelo?

Para dar solución al problema planteado, se proponen las siguientes **tareas científicas**:

1. Sintetizar los fundamentos teóricos-metodológicos de la gestión operativa de desastres, la programación lineal difusa multi-objetivo (PLDM) y los modelos de evacuación.
2. Describir los datos más relevantes para el proceso de evacuación en la provincia de Holguín.
3. Modelar mediante la PLDM, el problema de transporte asociado a la evacuación óptima de personas bajo amenaza de huracanes, en la provincia de Holguín.
4. Implementar a través del software MATLAB un programa que permita resolver varias instancias del modelo anterior, mediante los métodos de solución existentes en este software.
5. Discutir los resultados obtenidos en la Tarea 4.

Para llevar a cabo este proyecto han de combinarse varios métodos de investigación, tanto teóricos como empíricos. Específicamente, se emplearon como **métodos teóricos**:

Histórico y lógico: Se utilizó para determinar la existencia de investigaciones similares a la que se pretende realizar, y de existir alguna, conocer su estructura y la proporción en que satisface las necesidades vigentes.

Análisis y síntesis: Se utilizó para estudiar la composición del objeto y poder esbozar, y sintetizar los elementos fundamentales de la PLMD.

Inducción – deducción: Para estudiar y conocer diversos métodos de solución aplicables a la PLMD.

Modelación: Este método se utilizó durante el proceso de Modelación matemática, así como en la implementación de los métodos de solución aplicados.

Hipotético-Deductivo: Este método se utilizó para la elaboración de las preguntas científicas y para la verificación de su cumplimiento.

Los **métodos empíricos** que se emplearon fueron:

Entrevista: Debido a que en todo proceso de investigación existe un personal especializado en el tema, se tuvo en cuenta las sugerencias, criterios y necesidades que pudieron influir en la correcta concepción del modelo a crear. De ahí que se aplicara este método para obtener información y búsqueda de opiniones, además de recopilar elementos para el diseño del modelo.

En relación a los métodos experimentales, se empleó, para realizar pruebas, experimentar con las funciones implementadas, y así evaluar cuál es el resultado más conveniente.

Finalmente, es importante señalar que el informe de tesis está estructurado de la forma siguiente:

Capítulo 1. Fundamentos teóricos. Está orientado a mostrar los principales fundamentos, conceptos y metodologías utilizados para llevar a cabo el desarrollo de la investigación. Para esto se analizarán elementos tales como la PLDM, los métodos de solución existentes y los procesos de gestión operativa de desastres.

Capítulo 2. Implementación y análisis. Contiene la aplicación de los fundamentos teóricos antes mencionados en un problema real. El objetivo del capítulo es implementar un método de solución, brindar varias soluciones y proponer un análisis de los resultados obtenidos.

Luego se presentan las conclusiones y un conjunto de recomendaciones que se derivan de los resultados alcanzados.

Con este trabajo se espera mejorar la toma de decisiones en casos de desastres en la provincia Holguín, que permita salvar vidas y economizar los gastos a los que se enfrenta la provincia en estas situaciones. Así como la aplicación de este análisis al resto del país, en el futuro.

CAPÍTULO 1. PRELIMINARES

Este capítulo tiene como objetivo introducir los aspectos teóricos relacionados con la investigación. Primeramente se describirá los principales aspectos de la gestión de operativa de desastres, así como algunos conceptos básicos asociados a este proceso. Luego se brinda algunos de los principales componentes de la PLDM. En este sentido se describen los principales aspectos de la Programación Lineal (PL), Programación Lineal Multiobjetivo (PLM) y Programación Lineal Difusa (PLD).

1.1 Gestión operativa de desastres

La definición de Investigación de Operaciones (IO) no ha sido claramente definida en la literatura. Existen varias definiciones al respecto, por ejemplo, en (Churchman, y otros, 1957) la definen como la aplicación de métodos científicos, técnicas y herramientas a problemas que involucran las operaciones de sistemas, para proveer aquellos en el control de las operaciones con soluciones óptimas para los problemas. Otros la ven como un enfoque científico para toma de decisiones, qué busca determinar cómo es mejor diseñar y operar un sistema, normalmente bajo condiciones que requieren la asignación de recursos escasos (Winston, 1994). Estas y otras definiciones conllevan a “un enfoque científico a la toma de decisiones en sistemas complejos” (Altay, y otros, 2006). Precisamente, esta es la definición que se adoptará en el presente trabajo.

Para su clasificación y manejo la Federación Internacional de la Cruz Roja¹ posee una lista de los tipos de desastres a los que le prestan interés:

1. Los huracanes, los ciclones y tifones,
2. Diluvios

¹ <http://www.ifrc.org>

3. Sequía
4. Temblores tierra
5. Erupciones volcánicas
6. Epidemias
7. Hambruna
8. Desastres artificiales
9. Movimiento de la población
10. Desastres tecnológicos

Se entiende como **desastre** el acontecimiento o suceso que destruye las estructuras básicas y el funcionamiento normal de una sociedad o comunidad. Ocasiona pérdidas y afectaciones humanas, pérdidas o daños a la economía, la infraestructura, los servicios esenciales o medios de sustento, más allá de la capacidad normal de las comunidades afectadas para dar una respuesta. Los peligros de desastres, que potencialmente pueden afectar al país, han sido clasificados, atendiendo a su origen en: naturales, tecnológicos y sanitarios (Material de Estudio).

La posición geográfica del archipiélago cubano en el Mar Caribe, condiciona los riesgos ante amenazas de origen naturales (hidrometeorológicos, geológicos), tecnológicos y sanitarios. La aparición de una amenaza no desemboca automáticamente en un desastre; solo cuando la población expuesta a un peligro se encuentra en una situación vulnerable, aparece un riesgo de desastre para la misma.

En los últimos 20 años una nueva disciplina ha emergido en el contexto de la Investigación de Operaciones y las Ciencias de la Administración aplicadas en la gestión de desastres naturales. (Altay, y otros, 2006) la llamaron Gestión operativa de desastres (DOM)², y la definen como el conjunto de actividades realizadas previamente, durante y después a un desastre con el objetivo de prevenir la pérdida de

² Siglas en inglés de Disaster Operation Management

vidas humanas, reduciendo su impacto en la economía, y retornar a un estado de normalidad.

Los esfuerzos por respuesta a desastres consisten en dos fases, respuestas antes y después del evento. Las tareas antes del evento consisten en la predicción y el análisis de los peligros potenciales y desarrollar las acciones necesarias para el plan de mitigación. La respuesta después del evento comienza mientras todavía el desastre está en progreso. En esta fase el desafío es localizar, asignar, coordinar y manejar los recursos disponibles (Tufekci, y otros, 1998). Tufekci y Wallace también sugieren que un plan de respuesta de emergencia debe integrar las dos fases dentro de su objetivo. Ellos añaden que dividiendo estas fases se podría llevar soluciones sub-óptimas al problema general.

En Estados Unidos el manejo de desastres se describe comúnmente en cuatro fases programáticas: mitigación, preparación, respuesta y recuperación (Green III, 2002) (Waugh, 2000) (Waugh, y otros, 1990). El enfoque de cuatro fases cubre todas las acciones descritas en la clasificación de Tufekci y Wallace mientras provee de una vista mayor enfocada a las acciones de manejo de emergencia.

La mitigación es la aplicación de medidas que, o preverán el ataque de un desastre o reducirán los impactos en caso de ocurrir. Las actividades de preparación preparan a la comunidad para cuando un desastre ocurre. La respuesta es el empleo de recursos y procedimientos de emergencia que son guiados por los planes para conservar la vida, propiedad, el ambiente, y la estructura social, económica, y política de la comunidad. La recuperación involucra las acciones tomadas en un término largo después de que el impacto inmediato del desastre ha pasado, para estabilizar la comunidad y restaurar alguna semejanza a la normalidad. En la Tabla 1 se muestran las actividades típicas que involucra cada una de estas cuatro fases (Altay, y otros, 2006). La presente investigación se enmarca en la fase de “Respuesta”.

Tabla 1. Fases y actividades típicas de la gestión operativa de desastres según (Altay, y otros, 2006).

<ul style="list-style-type: none"> • Mitigación <ul style="list-style-type: none"> • Controlar el uso de las tierras y zonas divididas para prevenir la ocupación de áreas de mayor riesgo • Construcción de barreras para debilitar las fuerzas del desastre • Activar las medidas preventivas para controlar las situaciones en vías de desarrollo • Códigos de construcción para mejorar la resistencia de estructuras a los desastres • El incentivo tributario y el elemento disuasivo • Controlar y reconstruir después de los eventos • Exponer análisis para medir el potencial para riesgos extremos • Asegurarse de reducir el impacto financiero del desastre 	<ul style="list-style-type: none"> • Respuesta <ul style="list-style-type: none"> • Activación del plan de operaciones de emergencia • Activación del centro de operaciones de emergencia • Evacuación de la población amenazada • Abrir los refugios y provisiones de cuidado de las masas • Rescates de emergencia y cuidados médicos • Luchar el fuego • Búsqueda y rescate urbano • Protección de la infraestructura de emergencia y recuperación de los servicios de la línea de vida • Manejo de fatalidades
<ul style="list-style-type: none"> • Preparación <ul style="list-style-type: none"> • Reclutar personal para los servicios de emergencia y para el grupo de voluntarios de la comunidad • Plan de emergencia • El desarrollo de acuerdos mutuos y memorándums de entendimiento • Entrenamiento del personal y los ciudadanos interesados • Forjar la educación pública sobre amenaza • Presupuestar la adquisición de equipamiento y vehículos • Mantener los suministros de emergencia • Construir un centro de operaciones de emergencia • Desarrollar un sistema de comunicaciones • Conducir ejercicios de desastres para el entrenamiento de personal y pruebas de capacidades 	<ul style="list-style-type: none"> • Recuperación <ul style="list-style-type: none"> • Limpiar las ruinas del desastre • Asistencia financiera para individuos y gobiernos • Reconstrucción de carreteras, puentes y facilidades claves • El cuidado sostenido de las masas para el desplazamiento de la población humana y animal • Re-entierro de restos humanos desplazados • Completa recuperación de los servicios de ayuda en momentos críticos • Salud mental y ayuda pastoral

1.2 Programación lineal y extensiones multi-objetivo y difusa

A continuación se describen los conceptos de programación lineal, así como sus extensiones multi-objetivo, difusa, y la combinación de ambas.

1.2.1 Programación lineal

Desde que G.B. Dantzig inventó el método simplex alrededor de 1947, la programación lineal, un método de optimización utilizado para maximizar o minimizar una función objetivo lineal sujeto a restricciones lineales, atrajo interés a una inmensa cantidad de practicantes y académicos. En la actualidad, con los adelantos significativos en la tecnología de la computación, la programación lineal, junto con sus extensiones, se ha usado ampliamente en los campos de la ingeniería industrial, la ciencia de los sistemas, ciencia de dirección, e informática.

Forma estándar de la programación lineal

La forma estándar de la programación lineal utilizada es

$$\min Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

Sujeto a

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \tag{I}$$

... ..

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$$

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

donde a_{ij}, b_i y c_j son constantes reales. En particular b_i es conocido como el lado derecho de las restricciones, y c_i es en ocasiones llamado coeficiente de costo en un problema de minimización, mientras que en uno de maximización se le llama coeficiente de ganancia.

Usando la notación de sumatoria, puede re-escribirse de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} \min Z &= \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ \text{sujeto a } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j &\leq b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ x_j &\geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

Pero introduciendo un vector fila n-dimensional c , una matriz $A_{m \times n}$, un vector columna n-dimensional x y un vector columna m-dimensional b , la forma estándar se puede escribir de una forma más compacta:

$$\begin{aligned} \min Z &= cx \\ \text{sujeto a } Ax &\leq b \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

donde

$$c = (c_1, c_2, \dots, c_n)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

y 0 es un vector columna n-dimensional con elementos ceros.

Factibilidad y optimalidad

Existen varios términos que son usados para describir factibilidad y optimalidad de un punto. Primero se mencionará sobre términos asociados con factibilidad.

Definición 1 (punto factible): Un punto se dice que es factible si satisface todas las restricciones.

Definición 2 (región factible o conjunto factible): El conjunto de todos los puntos factibles se le denomina región factible o conjunto factible S .

El conjunto S de los puntos factibles es usualmente definido por un conjunto de restricciones como se vio en lo anterior. Para un problema sin restricciones, el conjunto S será K^n , el conjunto de vectores de longitud n cuyos componentes pertenecen al espacio K .

Definición 3 (solución): Diremos que x^* es una solución que minimiza Z si $Z(x^*) \leq Z(x) \forall x \in S$. Además el punto x^* lo llamaremos mínimo global. Si además de esto satisface que $Z(x^*) < Z(x)$ para todas las $x \in S$ tal que $x^* \neq x$ entonces x^* será un mínimo global estricto.

Es importante notar que no todas las funciones tienen un mínimo global finito, incluso si la función tiene un mínimo global esto no garantiza que sea un mínimo estricto. En la Figura 1. Región Factible. Donde X denota el conjunto de puntos factibles, definido por las restricciones de desigualdad presentes y la condición de no negatividad de las variables x_1 y x_2 . se podrá ver un ejemplo de región factible para un problema de 2-dimenciones. La . Tipos de mínimos globales muestra los distintos tipos de mínimos globales, estrictos, no globales y no estrictos.

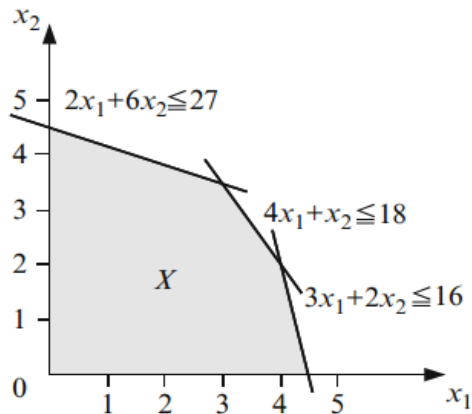


Figura 1. Región Factible. Donde X denota el conjunto de puntos factibles, definido por las restricciones de desigualdad presentes y la condición de no negatividad de las variables x_1 y x_2 .

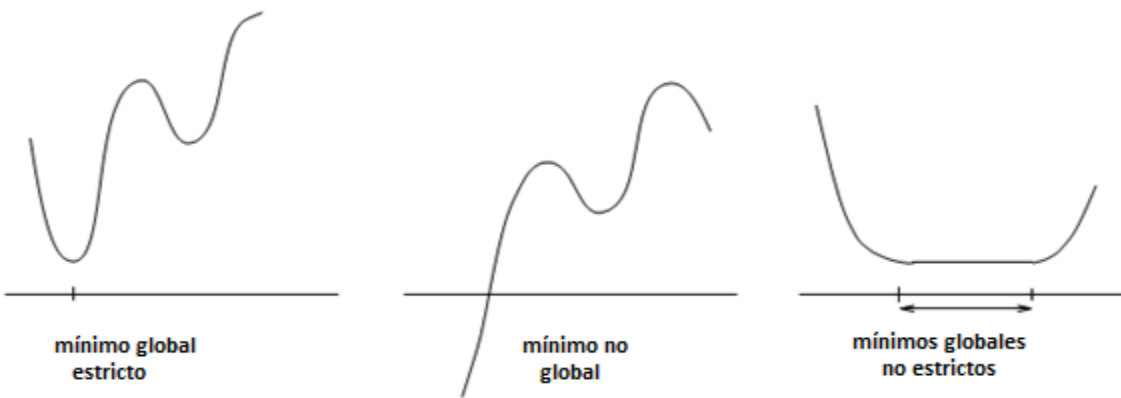


Figura 2. Tipos de mínimos globales.

Sin información adicional o suposiciones sobre el problema no será posible garantizar que una solución global se ha encontrado. Una importante excepción es en el caso donde la función Z y el conjunto de las restricciones S son convexos. Lo cual se cumple para problemas de programación lineal, como se verá más adelante.

En muchas situaciones no es posible encontrar una solución global, entonces suele buscarse un punto que sea mejor que los puntos en sus alrededores. Más precisamente un mínimo local de Z en S , ver ejemplos en Figura 1. Ejemplos de mínimos locales, satisfaciendo que

$$Z(x^*) \leq Z(x) \forall x \in S: ||x - x^*|| < \varepsilon$$

Aquí ε es un número pequeño positivo que puede depender de x^* .

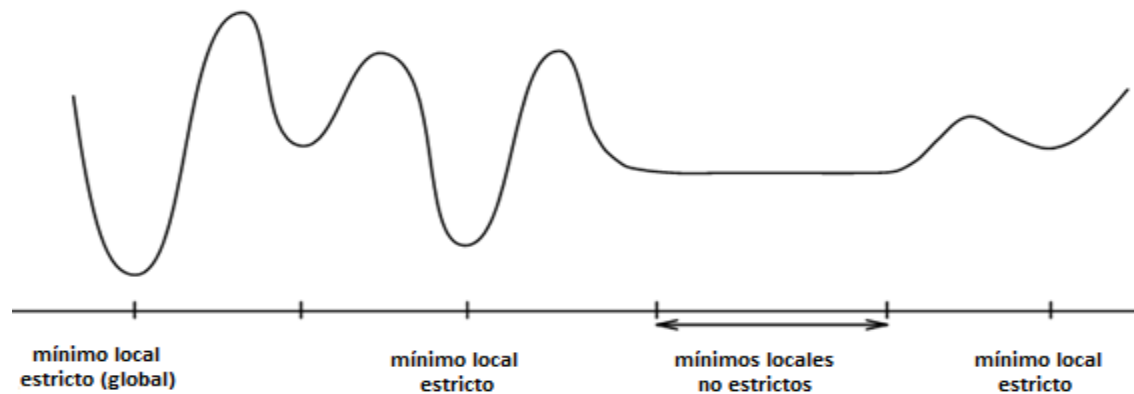


Figura 1. Ejemplos de mínimos locales.

Convexidad

Un caso importante donde los mínimos globales pueden ser encontrados, es el caso donde la función objetivo es una función convexa y el conjunto de las restricciones es un conjunto convexo (Griva, y otros, 2009).

Un conjunto S se dice convexo si para cualquier elemento x e y de S , se cumple que

$$\alpha x + (1 - \alpha)y \in S \quad \forall \alpha, 0 \leq \alpha \leq 1$$

En otras palabras si x e y están en S , entonces el segmento de la línea que une a x e y está también en S . Más generalmente, todo conjunto definido por un sistema de restricciones lineales es un conjunto convexo (Griva, y otros, 2009). Ver ejemplos en Figura 2. Conjuntos convexos y no convexos

Una función Z es convexa en un conjunto convexo S si esta satisface que

$$Z(\alpha x + (1 - \alpha)y) \leq \alpha Z(x) + (1 - \alpha)Z(y)$$



Figura 2. Conjuntos convexos y no convexos.

Para toda $0 \leq \alpha \leq 1$ y para toda x e $y \in S$ (Griva, y otros, 2009). Esta definición dice que el segmento de línea que conecta los puntos $(x, Z(x))$ y $(y, Z(y))$ están en o sobre el gráfico de la función, ver Figura 3.

Análogamente, una función es cóncava en S si satisface

$$Z(\alpha x + (1 - \alpha)y) \geq \alpha Z(x) + (1 - \alpha)Z(y) \quad \forall 0 \leq \alpha \leq 1 \wedge \forall x, y \in S.$$

Las funciones lineales son a la vez cóncavas y convexas.

Diremos que una función es estrictamente convexa si

$$Z(\alpha x + (1 - \alpha)y) < \alpha Z(x) + (1 - \alpha)Z(y) \quad \forall x \neq y \wedge 0 < \alpha < 1, \quad x, y \in S.$$

Quedará definido un problema de optimización convexa a un problema de la forma

$$\min Z(x) \quad x \in S$$

donde S es un conjunto convexo y Z es convexa en S .

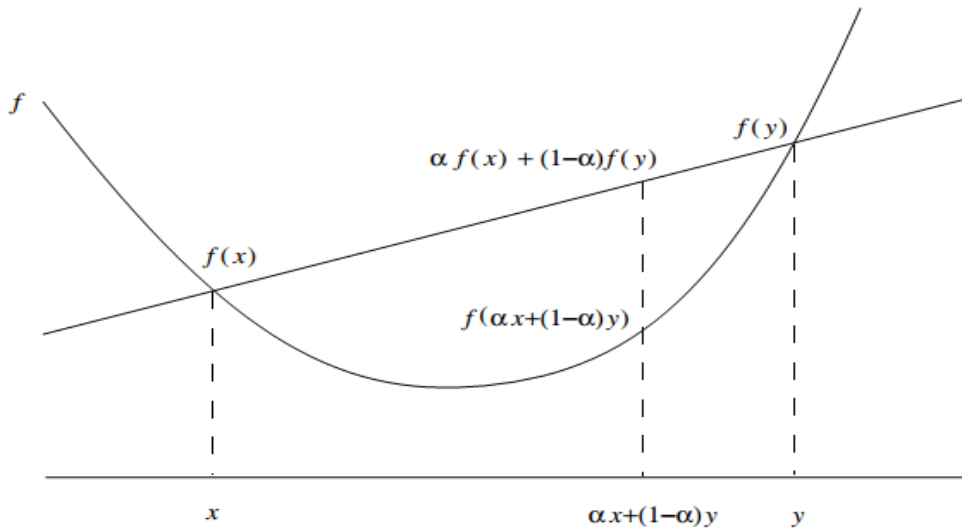


Figura 3. Función convexa.

El teorema siguiente muestra que cualquier solución local de un problema como estos es también una solución global. Esto es un resultado importante en los problemas de programación lineal, ya que cada problema de programación lineal es un problema de optimización convexa.

Teorema 1 (Soluciones globales de un problema de optimización convexa): Dejemos que x^* sea un mínimo local de un problema de optimización convexa. Entonces x^* es también un mínimo global. Si la función objetivo es estrictamente convexa, entonces x^* es el único mínimo global.

Demostración

La demostración es por contradicción. Dejemos que x^* sea un mínimo local y supongamos, por contradicción, que este no es un mínimo global. Entonces existe algún punto $y \in S$ que satisface que $Z(y) < Z(x^*)$. Si $0 < \alpha < 1$, entonces

$$\begin{aligned} Z(\alpha x^* + (1 - \alpha)y) &\leq \alpha Z(x^*) + (1 - \alpha)Z(y) \\ &< \alpha Z(x^*) + (1 - \alpha)Z(x^*) = Z(x^*) \end{aligned}$$

1.2.2 Programación lineal multi-objetivo

Este tipo de problemas puede generalizarse de la siguiente forma:

donde A , b y x son los elementos antes mencionados en el modelo de PL y

18

$$\begin{aligned}
\min Z &= (Z_1, Z_2, \dots, Z_k)^T \\
\text{sujeto a } Ax &\leq b, \\
x &\geq 0,
\end{aligned} \tag{II}$$

donde $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_k)^T = (c_1x, c_2x, \dots, c_kx)^T$ es un vector k -dimensional.

Se denotará la región factible del problema por

$$X = \{x \in \mathbb{R}^n | Ax \leq b, x \geq 0\}$$

Introduciendo una matriz $k \times n$, $C = (c_1, c_2, \dots, c_k)^T$ de los coeficientes de la función objetiva, podemos expresar el problema de programación lineal multi-objetivo de una forma más compacta:

$$\begin{aligned}
\min Z &= Cx \\
\text{sujeto a } x &\in X
\end{aligned}$$

Si directamente se aplicara las nociones de optimalidad de la programación lineal de un solo objetivo a esta programación lineal multi-objetivo, se llegaría a la siguiente noción de solución óptima completa.

Definición 4 (Solución óptima completa): Un punto x^* se dice que es una solución óptima completa si y solo si existe un $x^* \in X$ tal que $Z_i(x^*) \leq Z_i(x), i = 1, \dots, k, \forall x \in X$.

En general, encontrar una solución óptima completa que minimice todas las funciones objetivos en conflicto unas con otras es imposible. Entonces, en su lugar, un nuevo concepto de solución, llamado optimalidad de Pareto, se introduce en la programación lineal multi-objetivo.

Definición 5 (Solución óptima de Pareto): Un punto x^* se dice que es una solución óptima de Pareto si y solo si no existe otro $x \in X$ tal que $Z_i(x) \leq Z_i(x^*) \forall i$ y $Z_j(x^*) \neq Z_j(x)$ para al menos una j .

Como puede ser visto de la definición, una solución óptima de Pareto consiste de un número infinito de puntos. Una solución óptima de Pareto también es llamada una solución no inferior ya que esta no es inferior que las otras soluciones factibles.

Se han propuesto muchos métodos que se caracterizan por las soluciones óptimas de Pareto que dependen de las diferentes formas de enfoque de los problemas de programación lineal multi-objetivo. Entre las posibles vías de enfoque de problemas de optimización lineal multi-objetivo, el método de peso, el método de restricción, y el método de minimax pesado se han estudiado como medios de caracterizar soluciones óptimas de Pareto de problemas de optimización lineal multi-objetivo.

Método de peso

El método de peso para obtener una solución óptima de Pareto consiste en resolver el problema de peso formulado tomando la suma pesada de todas las funciones objetivo en el problema de programación lineal multi-objetivo original (Kuhn, y otros, 1951) (Zadeh, 1963). Entonces, el problema de peso es definido como:

$$\min_{x \in X} wZ = \sum_{i=1}^k w_i Z_i$$

donde $w = (w_1, \dots, w_k) \geq 0$ $w \neq 0$ es el vector de los coeficientes de peso asignados a las funciones objetivo.

Método de restricción

El método de restricción para obtener una solución óptima de Pareto consiste en resolver el problema restringido formulado tomando una función objetivo de (II) como la función objetivo del problema restringido y tomar las demás funciones objetivo como restricciones de desigualdad (Haimes, y otros, 1974) (Haimes, Y. Y.; Lasdon, L.; Wismer, D., 1971). El problema de restringido es definido como

$$\begin{aligned}
& \min Z_j(x) \\
& \text{sujeto a } Z_i(x) \leq \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, k; i \neq j \\
& x \in X
\end{aligned}$$

Método minimax ponderado

El método de minimax ponderado para obtener una solución óptima de Pareto consiste en resolver el siguiente problema de minimax ponderado (Bowman, 1976)

$$\min_{x \in X} \max_{i=1, \dots, k} \{w_i Z_i(x)\}.$$

O equivalentemente

$$\begin{aligned}
& \min v \\
& \text{sujeto a } w_i Z_i(x) \leq v, \quad i = 1, 2, \dots, k \\
& x \in X
\end{aligned}$$

donde v es una variable auxiliar.

Aquí sin perder generalidad, puede asumirse que $Z_i(x) > 0, i = 1, \dots, k, \forall x \in X$. Porque, para las funciones objetivo que no cumplan $Z_i(x) > 0 \forall x \in X$, usando sus mínimos individuales $Z_i^{\min} = \min_{x \in X} Z_i(x)$ y fijando $\hat{Z}_i(x) = Z_i(x) - Z_i^{\min}$, esta mantiene que $\hat{Z}_i(x) > 0 \forall x \in X$.

1.2.3 Programación lineal difusa

La extensión difusa de la programación lineal trata la incertidumbre de determinados elementos del modelo mediante la teoría de la Lógica difusa (Zadeh, 1963). Conviene por tanto definir primero que es un conjunto difuso.

Definición 6 (Conjunto difuso): Sea $Y \subseteq \mathbb{R}$ un conjunto no vacío. Un subconjunto difuso de Y es una función $\mu: Y \rightarrow [0,1]$, (Bukley, y otros, 2002).

El valor de y en la función μ expresa una medida o grado para el cual y está en Y . Si $\mu(y) = 1$ entonces $y \in Y$. Por otro lado, si $\mu(y) = 0$ se puede decir que $y \notin Y$. En el caso de $0 < \mu(y) < 1$, dicho valor proporciona el grado o porcentaje de pertenencia de y en Y . La función $\mu(x)$ recibe el nombre de “función de pertenencia”.

Cuando la función objetivo es difusa $Z = c_i x$ se supone que existe un valor de aspiración para la función objetivo. Dicho valor se denotará $d_0 \in \mathbb{R}$. Es decir se espera encontrar un $x^* \in X$ tal que $Z(x^*) \leq d_0$. En muchos casos no es posible encontrar una solución que satisfaga esta condición, por lo cual se permite que la función objetivo pueda alcanzar valores mayores a d_0 . Para esto, se fija un valor p_0 que define el grado mínimo de cumplimiento o pertenencia al nivel de aspiración. De esta forma, si $Z(x) \geq d_0 + p_0$, se dice que tiene un grado de cumplimiento de 0. Si $Z(x) \leq d_0$, el grado de cumplimiento o pertenencia es 1. Además, si $d_0 \leq Z(x) \leq d_0 + p_0$ entonces el grado o porcentaje de cumplimiento está dado por $1 - \frac{Z(x) - d_0}{p_0}$. Lo descrito anteriormente se puede expresar por medio de la siguiente función de pertenencia trapezoidal para la función objetivo Z (Jaroslav, 2001).

$$\mu_z(Z(x)) = \begin{cases} 1, & \text{si } Z(x) \leq d_0 \\ 1 - \frac{Z(x) - d_0}{p_0}, & \text{si } d_0 \leq Z(x) \leq d_0 + p_0 \\ 0, & \text{si } Z(x) \geq d_0 + p_0 \end{cases} \quad (\text{III})$$

Luego introduciendo una variable auxiliar λ , el modelo del problema con función objetivo difusa se expresa de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} & \max \lambda \\ & \text{sujeto a:} \\ & \mu_z \left(\sum_{i=1}^n c_i x_i \right) \geq \lambda \\ & x \in X, \lambda \in [0,1] \end{aligned} \quad (\text{IV})$$

Como puede verse en (Jaroslav, 2001), el problema anterior es equivalente al siguiente problema de optimización paramétrica

$$\begin{aligned}
 & \max \lambda \\
 & \text{sujeto a:} \\
 & \sum_{i=0}^n c_i x_i \geq d_0 - p_0(1 - \lambda) \\
 & x \in X, \lambda \in [0,1]
 \end{aligned} \tag{V}$$

cuya solución óptima (λ^*, x^*) se considera la solución del problema original con función objetivo difusa.

Si se está analizando un problema donde no solo la función objetivo, sino que además las restricciones son difusas, entonces se puede tomar la decisión difusa (Bellman, y otros, 1970) considerando que no existe diferencia entre función objetivo difusa $c_i x \leq d_0$ y restricciones difusas $Ax \lesseqgtr b$, este modelo se puede expresar de la forma siguiente (Zimmermann, 1976)

$$Bx \lesseqgtr b'$$

donde

$$B = \begin{bmatrix} c \\ A \end{bmatrix}, \quad b' = \begin{bmatrix} d_0 \\ b \end{bmatrix}.$$

Aplicando (III) a Bx , el modelo (V) quedaría de la siguiente forma

$$\begin{aligned}
 & \max \lambda \\
 & \text{sujeto a:} \\
 & \sum_{i=0}^n Bx_i \geq b'_i - p_0(1 - \lambda) \\
 & x \in X, \lambda \in [0,1]
 \end{aligned} \tag{VI}$$

1.2.4 Programación lineal multi-objetivo difusa

En 1987, (Zimmermann, 1987) extendió su enfoque sobre la programación lineal difusa al problema de programación lineal multi-objetivo (II) con k funciones objetivo $Z_i(x) = c_i x$, $i = 1, \dots, k$ (Sakawa, et al., 2013):

Para cada una de las funciones objetivo $Z_i(x) = c_i x$, $i = 1, \dots, k$ de este problema, se asume que el DM^3 , aquella persona especialista o capacitada para llevar a cabo la toma de decisiones, tenga un objetivo difuso tal como “la función objetivo $Z_i(x)$ debe ser menor que o igual a cierto valor d_i .” Entonces la correspondiente función de pertenencia puede ser escrita como:

$$\mu_i^L(z_i(x)) = \begin{cases} 0, & \text{si } z_i(x) \geq z_i^0 \\ \frac{z_i(x) - z_i^0}{z_i^1 - z_i^0}, & \text{si } z_i^0 \geq z_i(x) \geq z_i^1 \\ 1, & \text{si } z_i(x) \leq z_i^1 \end{cases} \quad (\text{VII})$$

donde z_i^0 y z_i^1 denotan los valores de la función objetivo $z_i(x)$ tales que los grados función de pertenencia sean 0 y 1, respectivamente.

Usando la función de pertenencia $\mu_i^L(z_i(x))$, $i = 1, \dots, k$ y siguiendo la decisión difusa por (Bellman, y otros, 1970), el modelo (II) puede interpretarse como

$$\begin{aligned} & \max \min_{i=1, \dots, k} \mu_i^L(z_i(x)) \\ & \text{sujeto a } Ax \leq b, \quad x \geq 0. \end{aligned}$$

Este problema puede ser reducido al siguiente problema de programación lineal convencional:

³ Siglas en inglés de Decisions Maker

$$\begin{aligned}
& \max \lambda \\
& \text{sujeto a } \lambda \leq \mu_i^L(z_i(x)) \\
& Ax \leq b, \quad x \geq 0,
\end{aligned}$$

Asumiendo la existencia de la solución óptima x^{io} del problema de minimización de las funciones objetivos individuales bajo las restricciones se define por

$$\min_{x \in X} z_i(x), \quad i = 1, \dots, k$$

donde $X = \{x \in \mathbb{R}^n | Ax \leq b, x \geq 0\}$, en (Zimmermann, 1987) el autor sugiere una forma para determinar la función lineal de pertenencia $\mu_i^L(z_i(x))$. Para ser más específicos, usando el mínimo individual

$$z_i^{min} = z_i(x^{io}) = \min_{x \in X} z_i(x), \quad i = 1, \dots, k,$$

junto con

$$z_i^m = \max\{z_i(x^{1o}), \dots, z_i(x^{i-1,o}), z_i(x^{i+1,o}), \dots, z_i(x^{ko})\}, \quad i = 1, \dots, k,$$

dicho autor determinó la función lineal de pertenencia como (VII) pero escogiendo $z_i^1 = z_i^{min}$ y $z_i^0 = z_i^m$. Para mayor claridad ver ejemplo en Anexo 2.

En el caso donde no solo las funciones objetivos sean difusas sino también las restricciones lo sean, utilizando igual función de pertenencia un análisis similar puede ser empleado (Sakawa, y otros, 2013).

1.3 Modelos de evacuación en desastres naturales

La mayoría de los modelos de evacuación disponibles definen su objetivo como minimizar el flujo del tráfico o el tiempo total de transportación (Sheffy, y otros, 1982) (Tufekci, y otros, 1991) (Ng, y otros, 2010). En (Chiu, y otros, 2007) (Yao, y otros, 2009) (Sayyady, y otros, 2010) consideraron seguridad en sus modelos, pero hacen esto

penalizando o prohibiendo soluciones que dejen evacuados detrás, al final de la evacuación. De manera similar, en localizar refugios, (Li, y otros) minimizan el peso promedio de las demandas no logradas por los refugios y el tiempo de transportación. La función objetivo en (Tan, y otros, 2009) minimiza una vez más el tiempo total de evacuación, pero incluyen restricciones sobre demostraciones y costos operativos para ocuparse de esos objetivos adicionales.

Varias estrategias mejoradas de evacuación han sido consideradas en la literatura, incluyendo: determinar la ruta de evacuación óptima y/o destino asignado (ej. (Yuan, y otros, 2006), (Chiu, y otros, 2007), (Tan, y otros, 2009), (Yao, y otros, 2009), (Ng, y otros, 2010)); planificar en etapas (también conocido como escenificar) la evacuación (ej. (Sbayti, y otros, 2006), (Chiu, y otros, 2007), (Chen, y otros, 2008) (Liu, y otros, 2008)); y otras estrategias de control de tráfico (Cova, y otros, 2003), (Theodoulou, y otros, 2004), (Tuydes, y otros, 2006) (Meng, y otros, 2008). Hay muchos aspectos de una evacuación: quién se queda, quién se va, cuándo se va, donde va, que ruta tomará para llegar ahí, y que camino y modo de transporte está disponible y cuándo. Cada modelo de evacuación asume cada uno de estos aspectos del problema son o un aporte incontrolable o algo que potencialmente puede controlarse a fin de mejorar la evacuación. Muchos de los primeros modelos son meramente descriptivos, asumiendo que cada dimensión brinda aporte. MASSVAC (Hobeika, y otros, 1985) (Hobeika, y otros, 1998), OREMS (Rathi, y otros), y NETVAC (Sheffy, y otros, 1982) son ejemplos de estos tipos de modelos. Estos tipos de modelos pueden ser usados de dos formas: 1) para estimar los tiempos de realización que ayuden a decidir cuando deberían ser emitidas las órdenes de evacuación a fin de asegurar el tiempo adecuado para la ejecución o 2) desarrollar planes de evacuación a través de un proceso por tanteo en el cual las suposiciones diferentes (los planes propuestos) de aporte son manejadas y el modelo se usa para evaluarlas. Otros modelos son preceptivos, asumiendo que uno o más aspectos del problema son potencialmente controlables y teniendo la intención de determinar la forma más óptima para controlarla. Estos modelos varían en que los aspectos están predeterminados por el comportamiento del sistema de transporte

existente o del evacuado, y que son considerados controlables, así se someten a la mejora a través de la implementación de una estrategia de evacuación.

En realidad, muchos aspectos de una evacuación son parcialmente controlables. Por ejemplo, no se puede asumir realmente que las personas cumplan con el momento exacto en que se les dice deben partir; de cualquier forma, a través de las órdenes de evacuación obligatorias, las autoridades pueden ejercer cierto control sobre quién se va y cuándo. Favorece, incluso si el proceso óptimo descrito por un modelo preceptivo no es enteramente factible en realidad, este puede ser usado para proveer en cómo bien puede ir un proceso de evacuación. El componente uno de la evacuación que, para el conocimiento de los autores, ha sido siempre considerado aporte es quién se va. Los modelos disponibles por consiguiente no permiten la posibilidad que la mejor estrategia para las personas podría ser quedarse dónde ellos están. Esta suposición está probablemente relacionada con la declaración del objetivo, como minimizar tiempo de despeje del tráfico, puesto que un modelo que deja a las personas quedarse cuando el único objetivo es minimizar el despeje del tránsito está aconsejando que todo el mundo se quede dónde está.

1.4 Características de la provincia de Holguín

La provincia de Holguín posee una extensión territorial de 9292.38 km^2 , lo que la convierte en la tercera provincia más grande de Cuba en cuanto a extensión territorial. Como se puede apreciar en la Figura 3 la provincia de Holguín presenta gran longitud de oeste a este y menor de norte a sur. Al presentar su municipio cabecera al oeste de la provincia, el centro de operaciones de emergencia no queda equidistante del resto de los municipios; lo que podría significar demoras en la gestión de la información, en caso de desastres, proveniente de municipios al este de la provincia, como son Moa y Sagua de Tánamo.

Contando con una población de 1032112 habitantes residentes la provincia presenta una desigual densidad de población entre los catorce municipios que la componen,

desde el municipio Antilla que cuenta con una población residente de 12222 habitantes hasta el municipio cabecera Holguín con 326740 de residentes (ONEI, 2013).

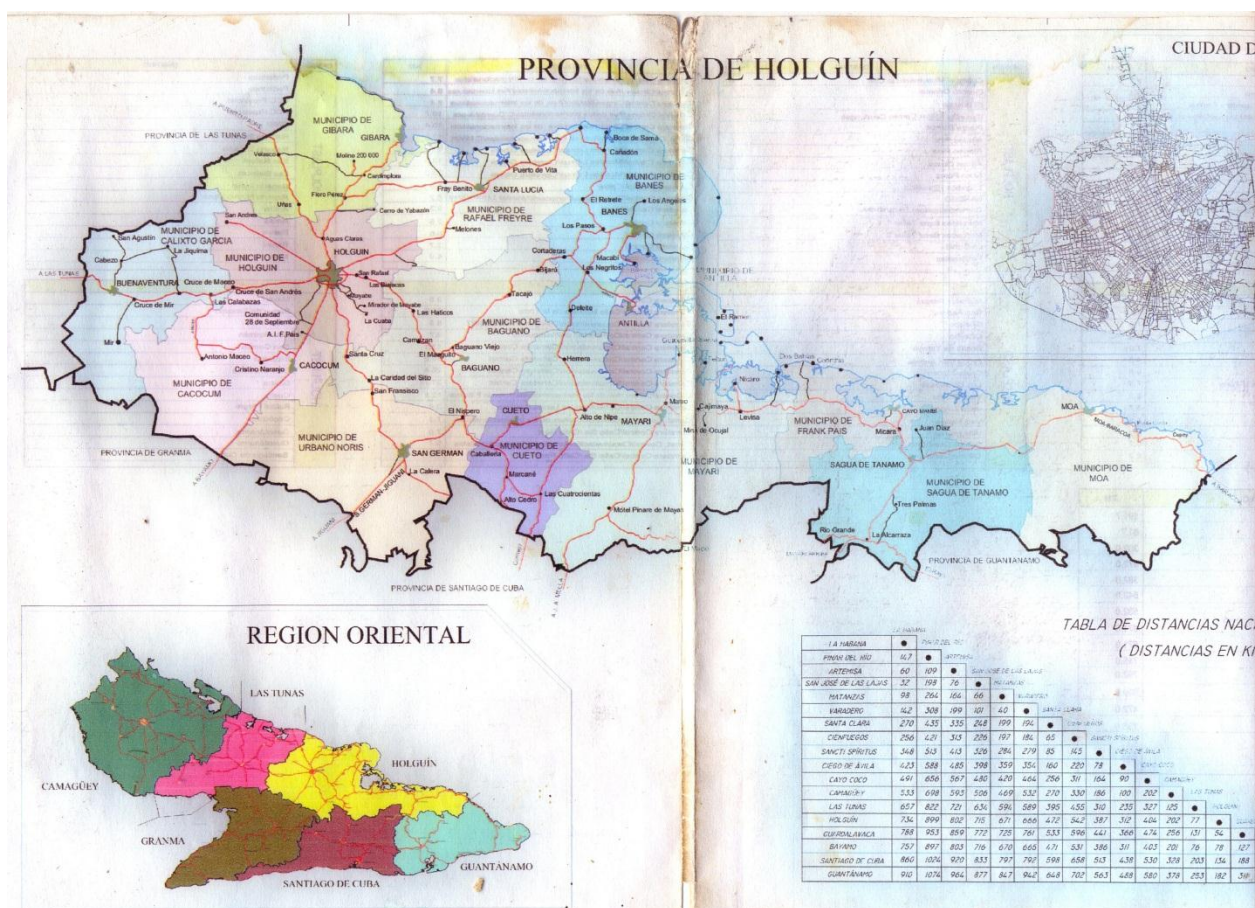


Figura 3. Mapa de la provincial de Holguín.

CAPÍTULO 2. ENFOQUE PROPUESTO

En este capítulo se presenta la aplicación de los fundamentos teóricos, antes mencionados, en un enfoque de solución aplicado a varias instancias del problema de transporte de evacuación de personas bajo amenaza en la provincia Holguín. Primeramente se brindará una descripción informal del problema, dando paso al enfoque propuesto. Luego se analiza el método de solución aplicado y sus pasos fundamentales. Terminando con el análisis de casos de estudio y la discusión de los resultados obtenidos.

2.1 Descripción del problema

Antes de exponer los detalles del enfoque propuesto conviene describir el escenario de decisión que se pretende resolver. El mismo se puede definir informalmente de la forma siguiente:

Dado un conjunto de centros de evacuación, con capacidades y costos de utilización conocidos, y de localidades con personas a evacuar, determinar el esquema de transporte que cumpla con las demandas de las localidades y minimice simultáneamente el tiempo total de evacuación y el costo de utilización de los centros. Téngase en cuenta que los tiempos de transportación, así como las capacidades de los centros de evacuación están definidos de manera imprecisa, esto es, sin seguir una distribución estadística conocida.

Una vez las personas han sido llevadas a los centros de evacuación, éstas se deben atender desde el punto de vista logístico y de salud. Para realizar dichas atenciones, existen centros de recursos (almacenes) y centros de salud (hospitales, policlínicos, etc.). Por lo tanto, sería importante tener en cuenta las capacidades de atención de estos centros, y que el tiempo de transportación total, desde los centros de evacuación a estos, sea mínima. Es decir, a partir de la solución encontrada para el problema de evacuación, sería conveniente determinar cómo atender de manera efectiva a estas

personas evacuadas, teniendo en cuenta que el tiempo total de transportación, así como la capacidad de estos centros son igualmente imprecisos.

2.2 Enfoque propuesto

Para dar solución al problema antes descrito se propone el siguiente enfoque. Del cual se describen los datos a tener en cuenta, las variables de decisión así como las funciones objetivos y las restricciones asociadas.

Datos de entrada

- t_{ij} : tiempo de transportación de un medio de transporte desde la localidad i hacia el centro j . Este tiempo viene dado en minutos.
- u_{jk} : tiempo de transportación de un medio de transporte desde el centro de evacuación j hacia el centro logístico k . Este tiempo viene dado en minutos.
- v_{jl} : tiempo de transportación de un medio de transporte desde el centro de evacuación j hacia el centro de salud l . Este tiempo viene dado en minutos.
- c_j : costo de utilización del centro j . Viene dado en \$.
- P_i : número de unidades de transportación (ut), cantidad de personas que ocupan un vehículo, que deben ser evacuados en la localidad i .
- K_j : capacidad del centro de evacuación j .
- M_k : capacidad de atención del centro logístico k .
- N_l : capacidad de atención del centro de salud l .

Variables de decisión

- x_{ij} : número de viajes a realizar desde la localidad i hasta el centro j .
- y_j : si se utiliza ($= 1$) o no ($= 0$) el centro de evacuación j .
- z_{jk}^1 : número de viajes a realizar desde la localidad j hasta el centro logístico k .
- z_{jl}^2 : número de viajes a realizar desde la localidad j hasta el centro médico l .

Funciones objetivo:

$$\min z_{te} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \quad \text{transpotación de evacuados} \quad (I)$$

$$\min z_{costo} = \sum_{j=1}^n c_j y_j \quad \text{costo de utilización de los centros} \quad (II)$$

$$\min z_{tl} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{\tilde{n}} u_{jk} z_{jk}^1 \quad \text{transpotación de atención logística} \quad (III)$$

$$\min z_{ts} = \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^o u_{jl} z_{jl}^2 \quad \text{transpotación de atención médica} \quad (IV)$$

Restricciones:

- *Restricciones de capacidad de los centros:*

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq K_j y_j \quad \forall j = \{1, \dots, n\} \quad (I)$$

$$\sum_{j=1}^n z_{jk}^1 \leq M_k \quad \forall k = \{1, \dots, \tilde{n}\} \quad (II)$$

$$\sum_{j=1}^n z_{jl}^2 \leq N_l \quad \forall l = \{1, \dots, o\} \quad (III)$$

- *Restricciones sobre el número de personas (en unidades de transporte) a evacuar en las localidades y su atención logística y médica:*

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = P_i \quad \forall i = \{1, \dots, m\} \quad (IV)$$

$$\sum_{k=1}^{\tilde{n}} z_{jk}^1 = \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad \forall j = \{1, \dots, n\} \quad (V)$$

$$\sum_{l=1}^o z_{jl}^2 = \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad \forall j = \{1, \dots, n\} \quad (VI)$$

$$x_{ij}, z_{jk}^1, z_{jl}^2 \geq 0: x_{ij}, z_{jk}^1, z_{jl}^2 \in \mathbb{Z}^+$$

$$y_j \in \{0, 1\}$$

Luego de intercambiar con la Lic. Marisol Fernández Rodríguez, explica que, en el caso de Cuba, la atención médica se realiza de una forma distinta a la analizada en el enfoque propuesto. Tomada en cuenta esta opinión, se realiza en próximas secciones un análisis del enfoque propuesto, en el que no aparece la función objetivo (IV) ni las restricciones (III) y (VI).

2.3 Solución mediante MATLAB

Para la solución de este problema se utilizó el enfoque sugerido por Zimmermann, descrito en la Sec. 1.2.4, aplicado a la función de pertenencia (VII). Siguiendo el enfoque de (Bellman, y otros, 1970) para decisión difusa, se considera que no existe diferencia entre funciones objetivo difusas $c_i x \leq d_0$ y restricciones difusas $Ax \lesseqgtr b$, se aplica entonces de igual forma la función de pertenencia tanto a las funciones objetivos difusos como a las restricciones difusas. De tal manera nuestro modelo sería transformado en un modelo de tipo (VI), añadiendo las restricciones no difusas.

Al aplicar la función de pertenencia (VII) a las funciones objetivo difusas (I), (III) y (IV) estas toman la siguiente forma:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} - (z_{te}^1 - z_{te}^0) \lambda \leq z_{te}^0$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{\tilde{n}} u_{jk} z_{jk}^1 - (z_{tl}^1 - z_{tl}^0) \lambda \leq z_{tl}^0$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^o u_{jl} z_{jl}^2 - (z_{ts}^1 - z_{ts}^0) \lambda \leq z_{ts}^0$$

donde z^0 y z^1 expresan los máximos y mínimos que alcanzan dichas funciones de forma independiente y asociadas a las restricciones no difusas.

```
for i=1:cantfundif
    [~,fvalmin(i)]=linprog(zdif(i,:),[],[],Aeq,beq,lb,up,[],options);
    [~,fvalm(i)]=linprog(-zdif(i,:),[],[],Aeq,beq,lb,up,[],options);
    z0d(i)=-fvalm(i);
    zrestd(i,:)=[zdif(i,:) -(fvalmin(i)+fvalm(i))];
end
```

En el caso de las restricciones de desigualdad (I), (II) y (III) se sigue la decisión difusa (Bellman, et al., 1970) considerando que no existe diferencia entre función objetivo difusa y restricción difusa por lo que se aplica de igual forma la función de pertenencia; considerando que bm y $bmin$ son los valores máximos y mínimos permitidos por el *DM* a tales restricciones, estas quedarían de la siguiente forma:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} - K_j y_j - (b_{min} - b_m) \lambda \leq b_m$$

$$\sum_{j=1}^n z_{jk}^1 - M_k - (b_{min} - b_m) \lambda \leq b_m$$

$$\sum_{j=1}^n z_{jl}^2 - N_l - (b_{min} - b_m) \lambda \leq b_m$$

```
for i=1:cantrestdif
    bdifa(i)=bm(i);
    Adifa(i,:)=[Adif(i,:) -(bmin(i)-bm(i))];
end
```

Solo queda plantear el modelo (VI), unir las funciones objetivos con las restricciones de desigualdad y crear la nueva función objetivo. Luego este es resuelto mediante *linprog*, algoritmo de optimización para programación lineal que utiliza el método simplex.

```
fun=zeros(1,cantvar) -1];
Bx=[Adifa;zrestd];
bpri=[bdifa,z0d];
Bxeq=[Aeq,zeros(cantrestndifeq,1)];
bprieq=beq;
[x,solucion]=linprog(fun,Bx,bpri,Bxeq,bprieq,[lb,-inf],[up,inf],[],options);
```

Es importante destacar que el código descrito anteriormente, se encuentra disponible en los recursos digitales que acompañan a esta tesis.

Antes de finalizar la presente sección se describirá a través de un ejemplo simple como el método descrito da solución al problema. Las características de la instancia del problema a resolver son las siguientes:

Considere que se desean evacuar 4 localidades con una población de 6, 4, 3 y 9 ut y se cuenta con 3 centros de evacuación con capacidades para 7, 6 y 9 ut. Estos a su vez reciben atención desde 3 centros logísticos y 3 centros médicos, con capacidades de atención para 8, 7 y 7 ut y 6, 8 y 8 ut respectivamente. El costo de utilización de los centros de evacuación y la distancia desde los municipios hasta cada centro de evacuación, a su vez, de estos hasta los centros de atención; se representan en las funciones objetivo y se describen como

$$z_{te} = \begin{bmatrix} 30 & 60 & 20 \\ 50 & 20 & 40 \\ 40 & 40 & 30 \\ 30 & 50 & 30 \end{bmatrix} \text{ transpotación de evacuación}$$

$$z_{costo} = [4 \ 5 \ 3] \text{ costo de utilización de los centros}$$

$$z_{tl} = \begin{bmatrix} 30 & 40 & 50 \\ 40 & 50 & 30 \\ 50 & 30 & 40 \end{bmatrix} \text{ transpotación de atención logistica}$$

$$z_{ts} = \begin{bmatrix} 30 & 40 & 50 \\ 50 & 30 & 50 \\ 40 & 40 & 30 \end{bmatrix} \text{ transpotación de atención médica}$$

Según la solución encontrada a través del método descrito se crea el diagrama de flujo expuesto en la Figura 4:

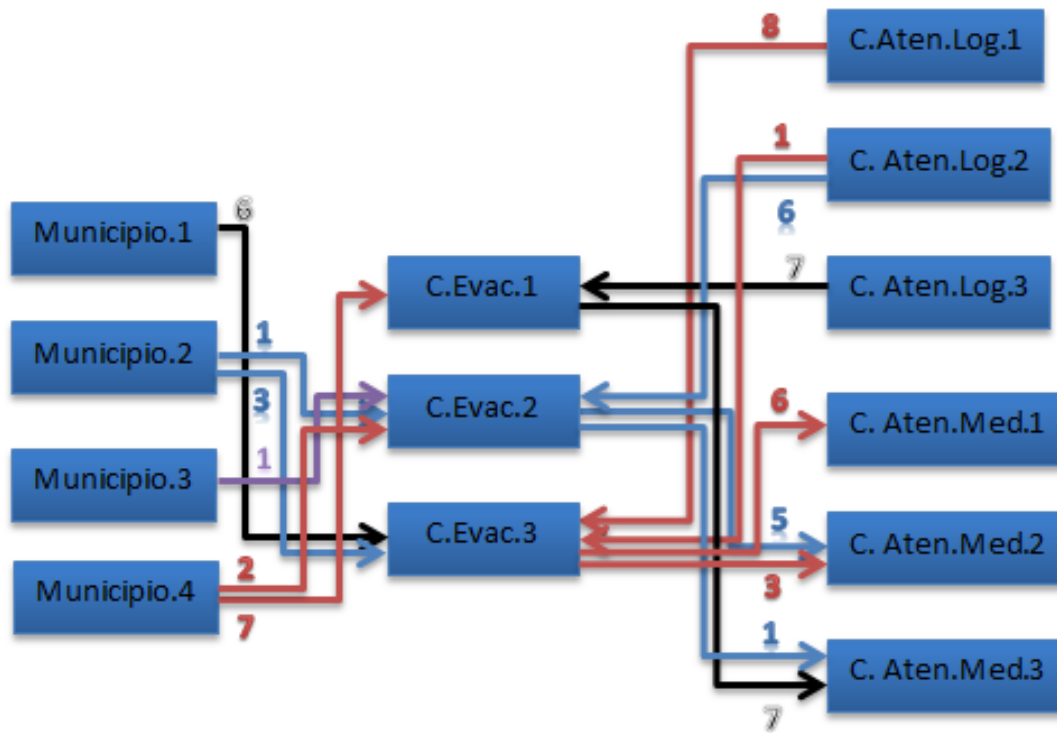


Figura 4. Diagrama de flujo.

donde los valores presentes indican la cantidad de unidades de transportación.

2.4 Casos de estudio

Debido a la seguridad con la que se manejan estos datos, no están disponibles al público, por lo que no fue posible obtener los datos reales que se manejan en el proceso de evacuación de personas bajo amenaza de huracanes en la provincia de Holguín. No obstante, se utilizó para los casos de estudio, datos diseñados, que están cerca de la realidad.

Tabla 2. Casos de estudios

	Con atención médica	Sin atención medica
Datos I	Caso de estudio I (CE1)	Caso de estudio III (CE3)
Datos II	Caso de estudio II (CE2)	Caso de estudio IV (CE4)

Para la elaboración de los casos de estudio se consideraron dos casos o escenarios, uno en el cual se analiza el enfoque propuesto, en el que se incluye atención médica y en el otro, tomando en cuenta la opinión analizada en la Sec.2.2, no se incluye atención médica, cada uno evaluado en dos instancias del problema. Estas instancias presentan las siguientes características:

Considere que se desea evacuar 14 municipios con poblaciones P_i y se cuenta con 47 centros de evacuación con capacidad para K_j . Estos, a su vez, reciben atención logística desde 33 centros con capacidades para M_k y atención médica desde 33 centros con capacidades para N_l . El costo de utilización de los centros de evacuación es de c_j . Los factores que se variaron fueron las distancias desde los municipios hasta los centros de evacuación, ver ejemplo en Anexo 3, y de estos hasta los centros de atención logística y médica.

- $c_j = [1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8\ 9\ 1\ 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8\ 9\ 2\ 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8\ 9\ 3\ 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8\ 9\ 4\ 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7]$ costo de utilización del centro j . Viene dado en miles de \$.
- $P_i = [12\ 26\ 55\ 5\ 21\ 27\ 14\ 62\ 31\ 66\ 25\ 22\ 46\ 26]$ número de unidades de transportación, que deben ser evacuados en la localidad i .
- $K_j = [5\ 3\ 13\ 13\ 13\ 12\ 19\ 19\ 19\ 7\ 6\ 6\ 6\ 6\ 6\ 2\ 2\ 15\ 10\ 9\ 8\ 8\ 9\ 13\ 13\ 13\ 13\ 12\ 15\ 8\ 8\ 8\ 8\ 8\ 9\ 9\ 9\ 9\ 8\ 8\ 8\ 9\ 8\ 5\ 3\ 10]$ capacidad del centro de evacuación j .
- $M_k = [9\ 5\ 17\ 17\ 16\ 23\ 23\ 10\ 10\ 10\ 10\ 6\ 19\ 14\ 13\ 11\ 13\ 18\ 16\ 17\ 19\ 12\ 12\ 12\ 12\ 13\ 13\ 12\ 12\ 12\ 9\ 9\ 14]$ capacidad de atención del centro logístico k .
- $N_l = [7\ 7\ 15\ 15\ 16\ 20\ 23\ 12\ 13\ 12\ 10\ 10\ 13\ 12\ 15\ 10\ 14\ 17\ 17\ 17\ 19\ 10\ 14\ 11\ 13\ 13\ 12\ 13\ 12\ 12\ 11\ 11\ 12]$ capacidad de atención del centro de salud l .

Tabla 3. Análisis de los casos de estudio

	Enfoque difuso (Zimmermann, 1976)	Tiempo (seg.)	Enfoque no difuso (Minmax ponderado (Bowman, 1976))	Tiempo (seg.)
CE1	(7701,218, 5851, 7401)	4.489904	(7218, 218, 5439, 6985)	21.411992
CE2	(8234, 218, 4184, 5703)	4.496354	(7662, 218, 4149, 5615)	22.149234
CE3	(7701,218, 5851)	3.330397	(7218, 218, 5439)	7.964351
CE4	(8240, 218, 4179)	3.011402	(7662, 218, 4149, 5615)	7.907791

En la Tabla 3 se presenta un análisis de los casos de estudio, en el que se muestran los tiempos totales de transportación y el costo de utilización de los centros. También se propone la solución de estos casos de estudio, resueltos como problemas sin un enfoque difuso a través del método minimax ponderado descrito en la Sec. 1.2.2. Además de los tiempos de ejecución de los algoritmos en cada instancia.

Centrando el análisis solo en la parte cuantitativa de los resultados obtenidos, en los casos de estudio, se puede concluir que el modelo difuso arroja peores resultados que el modelo no difuso. Pero absolutizar la superioridad de uno sobre otro no es posible, pues en el aspecto cualitativo, el modelo difuso se considera superior, al no difuso, ya que logra incorporar situaciones donde el decisor tiene frente a si imprecisión en los datos. Por otra parte si se analiza el tiempo de ejecución de los algoritmos implementados, aquel que brinda solución al enfoque no difuso puede tardar hasta cuatro veces el tiempo de ejecución del otro. Para la implementación de los algoritmos se utilizó el MATLAB, un lenguaje de programación de alto nivel, con un enfoque predominantemente matemático; que permite obtener resultados rápidos y confiables.

CONCLUSIONES

Al terminar la presente investigación se puede concluir que la misma da respuesta al problema científico, cumple con el objetivo y las tareas de la investigación. En síntesis se exponen los siguientes resultados:

- Los fundamentos teóricos-metodológicos estudiados sobre la gestión operativa de desastres, la programación lineal difusa multi-objetivo y los modelos de evacuación resultaron de vital importancia para un correcto análisis del problema enfrentado;
- el enfoque lineal difuso y multi-objetivo propuesto contribuye a la gestión operativa de desastres al facilitar la toma de decisiones teniendo en cuenta múltiples criterios y la presencia de incertidumbre en los datos;
- la función de pertenencia sugerida por Zimmermann, así como el enfoque propuesto por Zadeh resultan pertinentes para el problema asociado, por sus facilidades de aplicación e indiferencia a la importancia entre función objetivo difusa y restricciones difusas;
- la implementación se realizó sobre la plataforma de programación Matlab, software que resultó efectivo, por sus atributos: exactitud y confiabilidad.

RECOMENDACIONES

Como trabajo futuro se proponen las siguientes recomendaciones al finalizar esta investigación:

- Proponer convenios formales con la Defensa Civil en el territorio para trabajar con datos más reales, y dotar de un sentido más realista al presente modelo;
- analizar el problema utilizando distintos tipos de transporte en el modelo, de manera que se parezca más a una situación real;
- implementar una interfaz gráfica que facilite la interacción de los usuarios con el modelo.

BIBLIOGRAFÍA

Altay Nezih y Green III Walter G. OR/MS research in disaster operations management [Publicación periódica] // European Journal of Operational Research. - 2006. - 1 : Vol. 175. - págs. 475-493.

Bellman R. E. y Zadeh L. A. Decision making in a fuzzy environment. [Publicación periódica] // Management. - 1970. - págs. 17,141-164.

Bowman V. J. On the relationship of the Tchebycheff norm and the efficient frontier of multi-criteria objectives [Sección de libro] // Multiple criteria decision making / aut. libro Thiriez H. y Zionts S.. - Berlin : Springer, 1976.

Bukley J. y Esfandiar E. An introduction to fuzzy logic and fuzzy set [Libro]. - Heidelberg : Physica-Verlag, 2002.

Chen X y Zhan FB Agent-based modeling and simulation of urban evacuation: relative effectiveness of simultaneous and staged evacuation strategies [Publicación periódica] // J Oper Res Soc. - 2008. - págs. 25-33.

Chiu Y C [y otros] Modeling no-notice mass evacuation using a dynamic traffic flow optimization model [Publicación periódica] // IIE Trans. - 2007. - págs. 93-94.

Churchman C. W., Ackoff R. L. y Arnoff E. L. Introduction to the Operations Research [Libro]. - New York : Jhon Wiley & Son, 1957.

Cova TJ y Jhonson JP A network flow model for lane-based evacuation routing [Publicación periódica] // Transp Res Part A. - 2003. - págs. 579–604.

Green III Walter G. Four phases of emergency management [Libro]. - [s.l.] : Electronic Encyclopedia of Civil Defense and Emergency Management, 2002.

Griva Igor, Nash Stephen G. y Sofer Ariela Linear and Nonlinear Optimization [Libro]. - Virginia : Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009. - 2da.

Haimes Y. Y. y Hall W. A. Multiobjectives in water resources systems analysis: the [Publicación periódica] // Water Resources Research. - 1974. - págs. 10,614-624.

Haimes, Y. Y.; Lasdon, L.; Wismer, D. On a bicriteria formulation of the problems of integrated system identification and system optimization [Publicación periódica] // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. - 1971. - págs. SMC-1,296-297.

Hobeika AG y Jamei B MASSVAC: a model for calculating evacuation times under natural disaster [Publicación periódica] // Emerg Plan Simul Ser. - 1985. - págs. 23-28.

Hobeika AG y Kim CK Comparison of traffic assignments in evacuation modeling [Publicación periódica] // IEEE Trans Eng Manag. - 1998. - págs. 192-198.

International Federation of Red Cross and Red [En línea]. - <http://www.ifrc.org>.

Jaroslav R. Soft Computing: Overview and Recent Developments in Fuzzy Optimization [Informe]. - Linstopad : Ostravská Universita, 2001.

Kóvacs Gyöngyi y Spens Karen M. [Artículo] // International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. - 20 de 3 de 2007. - págs. 99-114.

Kuhn H. W. y Tucker A. W. Nonlinear programming. In J. Neyman (Ed.) [Sección de libro] // Proceedings of the second berkeley symposium on mathematical statistics and probability. - California : Univesity of California Press, 1951.

Li ACY [y otros] Bilevel optimization for integrated shelter location analysis and transportation planning for hurricane events [Artículo] // J Infrastruct Syst.

Liu Y [y otros] Corridor-based emergency evacuation system for Washington, D.C. system development and case study [Sección de libro] // Transp Res Rec J / aut. libro Board Transp Res. - 2008.

Material de Estudio Aspectos Basicos de la Seguridad y la Defensa Nacional de Cuba [Libro]. - [s.l.] : REPUBLICA DE CUBA.

Meng Q y Khoo HL Optimizing contra flow scheduling problem: model and algorithm [Publicación periódica] // J Intell Transp. - 2008. - págs. 126-138.

Ng M W, Park J y Waller S T A hybrid bilevel model for the optimal shelter assignment in emergency evacuation [Publicación periódica] // Comput Aided Civil Infrastruct Eng. - 2010. - págs. 547-556.

Nikbakhsh Ehsan y Farahani Reza Zanjirani Humanitarian logistics planning in disaster relief operations [Sección de libro] // Logistics Operations and Management: Concepts and Models. - [s.l.] : Elsevier Insight, 2011.

ONEI Anuario Demográfico de Holguín [Informe]. - Holguín : Oficina Nacional de Estadística e Información, 2013.

Rathi AK y Solanki RS Simulation of traffic flow during emergency evacuations: a microcomputer based modeling system [Conferencia] // Proceedings of the 1993 winter simulation conference. - págs. 1250-1258.

Sakawa Masatoshi, Yano Hitoshi y Nishizaki Ichiro Linear and Programing with Fuzzy Stochastic Extensions [Libro]. - New York : Springer, 2013.

Sayyady F y Eksioglu S D Optimizing the use of public transit system during no-notice evacuation of urabn areas [Publicación periódica] // Comput Ind Eng. - 2010. - págs. 488-495.

Sbayti H y Mahmassani HS Optimal scheduling of evacuation operations [Sección de libro] // Transp Res Rec J / aut. libro Board Transp Res. - 2006.

Sheffy Y., Mahmassani H. y Powell W B A transportation network evacuation model [Publicación periódica] // Trans Res A Policy Pract. - 1982. - págs. 209-218.

Tan Q [y otros] Development of an inexact fuzzy robust programming model for integrated evacuation management under uncertainty [Publicación periódica] // J Urban Plan Dev. - 2009. - págs. 39-49.

Theodoulou G y Wolshon B Alternative methods to increase the effectiveness of freeway contraflow evacuation [Publicación periódica] // Transp Res Rec J Transp Res Board 1865. - 2004. - págs. 48-56.

Tufekci S. y Kisko T M Regional evacuation modeling system (REMS): a decision support system for emergency area evacuations [Publicación periódica] // Comput Ind Eng. - 1991. - págs. 89-93.

Tufekci S. y Wallace W. A. The emerging area of emergency management and engeneering. [Publicación periódica] // IEEE Transactions on Engeneering Management. - 1998. - págs. 103-105.

Tuydes H y Ziliaskopoulos A Tabu-based heuristic approach for optimization of network evacuation contraflow [Sección de libro] // Transp Res Rec J Transp Res Board 1964 / aut. libro TRC National Research Council. - Washington DC : [s.n.], 2006.

Wales Jimmy y Sanger Larry Wikipedia [En línea]. - 15 de 1 de 2001. - 24 de 3 de 2015. - <http://www.wikipedia.org>.

Wassenhove Luk N Van [Artículo] // Journal of the Operational Research Society. - 1 de 5 de 2006. - págs. 475-489.

Waugh W.L Jr. y Hy R. J. Handbook of Emergency Management:Programs and Policies Dealing with Major [Libro]. - New York, NY : Greenwood Press, 1990.

Waugh W.L. Jr. Living with Hazards, dealing with Disasters: An Introduction to Emergency Management [Libro]. - Armonk, NY : M.E. Sharpe, 2000.

wikipedia [En línea].

Wikipedia [En línea]. - 24 de 3 de 2015. - <http://www.wikipedia.org/>.

Winston W. L. Operations Research: Applications and Algorithms [Libro]. - Belmont, California : third ed. Duxbury Press, 1994.

Yao T, Mandala S R y Chung B D Evacuation transportation planning under uncertainty: a robust optimization approach [Publicación periódica] // Netw Spat Econ. - 2009. - págs. 171-189.

Yuan F [y otros] Proposed framework for simultaneous optimization of evacuation traffic destination and route assignment [Sección de libro] // Transportation Research Record No. 1964 / aut. libro Board Transportation Research. - Washington, DC : [s.n.], 2006.

Zadeh L. A. Optimality and not-scalar valued performance criteria [Sección de libro] // IEEE Transaction on Automatic Control. - 1963.

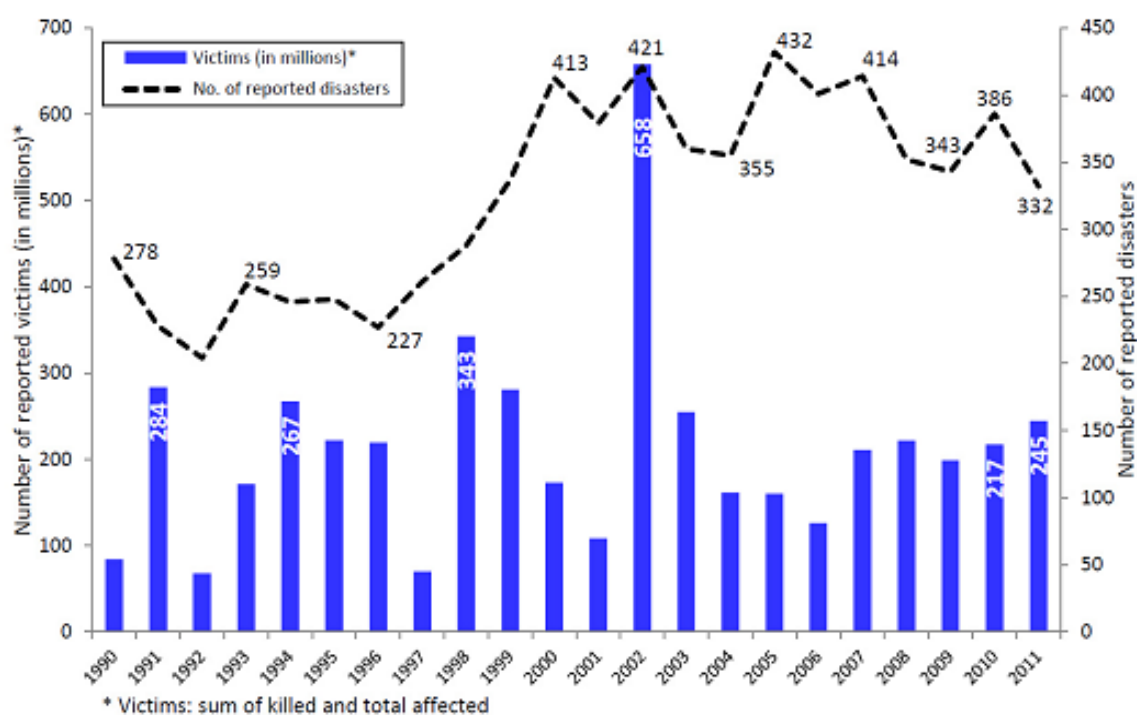
Zimmermann H. -J. Description and optimization of fuzzy system [Publicación periódica] // International Journal of General Systems. - 1976. - 2. - págs. 209-215.

Zimmermann H. -J. Fuzzy sets, decision-making and expert systems [Libro]. - Boston : Kluwer, 1987.

ANEXOS

Anexo 1: Número de desastres naturales y víctimas.

En la gráfica que se muestra en este anexo se ilustra la evolución del número de víctimas y de desastres reportados a lo largo del tiempo. Concretamente en el período 1990-2011. Se puede observar que existe una tendencia al crecimiento de ambos indicadores.



Anexo 2: Ejemplo (Planificación de la producción de dos objetivos en un ambiente difuso).

Para ilustrar el método propuesto por Zimmermann para la programación lineal multi-objetivo difusa, consideraremos el siguiente problema de planificación de producción de dos objetivos en un ambiente difuso.

$$\begin{aligned} \min z_1 &= -3x_1 - 8x_2 \\ \min z_2 &= 5x_1 + 4x_2 \\ \text{sujeto a } 2x_1 + 6x_2 &\leq 27 \\ 3x_1 + 2x_2 &\leq 16 \\ 4x_1 + x_2 &\leq 18 \\ x_1 &\geq 0, x_2 \geq 0. \end{aligned}$$

Los mínimos y máximos individuales de las funciones individuales son

$$z_i^{\min} = -37, \quad z_i^m = 0, \quad z_i^{\min} = 0, \quad z_i^m = 29.$$

Asumiendo que el DM determinó subjetivamente la correspondiente función de pertenencia $\mu_i^L(z_i)$, $i = 1, 2$ como sigue:

$$\text{Objetivo difuso para } z_1: \mu_1(-35) = 0, \mu_1(0) = 1$$

$$\text{Objetivo difuso para } z_2: \mu_2(24) = 0, \mu_2(20) = 1$$

Para ser más específicos, los objetivos difusos del DM se asumieron para ser expresados mediante las siguientes funciones de pertenencia:

$$\mu_1^L(z_1(x)) = \begin{cases} 0, & \text{si } z_1(x) \geq -35 \\ \frac{-3x_1 - 8x_2 + 35}{-2}, & \text{si } -35 \geq z_1(x) \geq -37 \\ 1, & \text{si } z_1(x) \leq -37 \end{cases}$$

$$\mu_2^L(z_2(x)) = \begin{cases} 0, & \text{si } z_2(x) \geq 24 \\ \frac{5x_1 + 4x_2 - 24}{-4}, & \text{si } 24 \geq z_2(x) \geq 20 \\ 1, & \text{si } z_2(x) \leq 20 \end{cases}$$

Entonces el problema de programación lineal equivalente se formuló con el próximo modelo. Resolviendo este problema por el método simplex de programación lineal se obtiene la siguiente solución óptima

$$\begin{aligned} &\max \lambda \\ &\text{sujeto a: } 1.5x_1 + 4x_2 - \lambda \geq 17.5 \\ &\quad 1.25x_1 + x_2 + \lambda \leq 6 \\ &\quad 2x_1 + 6x_2 \leq 27 \\ &\quad 3x_1 + 2x_2 \leq 16 \\ &\quad 4x_1 + x_2 \leq 18 \\ &\quad x_1 \geq 0, x_2 \geq 0. \end{aligned}$$

Solución $x_1 = 0.92308$, $x_2 = 4.19231$, $\lambda = 0.65385$.

Esto significa que la satisfacción global de los objetivos difusos del DM es de 0.65385, la función objetivo z_1 alcanza un valor de 36.30769, y función objetivo z_2 alcanza un valor de 21.38462. El punto $(x_1, x_2) = (0.92308, 4.19231)$ o $(z_1, z_2) = (36.30769, 21.38462)$ puede ser comprendido como la solución óptima de Pareto del problema de programación lineal multi-objetivo original.

Anexo 3: Tabla de distancias desde cada municipio (columnas) hasta cada centro de evacuación (filas).

CENTxMUN	ANILLA	BAGUANOS	BANES	CACOCUM	CALIXTO	CUETO	FRANK	GIBARA	HOLGUIN	MAYARI	MOA	RAFAEL	SAGUA	URBANO
ANT1	10	23	12	44	73	14	46	56	27	20	58	88	41	13
ANT2	7	26	16	43	80	19	50	60	32	23	61	94	47	18
BAG1	31	13	38	43	80	40	60	70	60	40	85	130	75	44
BAG2	19	24	35	68	96	50	75	75	74	65	94	80	88	52
BAG3	31	18	27	74	126	60	90	95	98	48	129	94	99	70
BAG4	26	22	21	65	146	70	100	122	110	64	149	122	120	72
BAN1	10	30	7	50	70	30	50	60	50	32	72	72	54	33
BAN2	13	35	10	62	84	35	62	70	60	44	88	88	71	44
BAN3	15	42	3	79	96	40	79	90	80	39	99	114	83	38
CAC1	42	71	51	7	49	31	65	25	15	45	72	28	125	40
CAC2	54	79	64	5	51	37	79	29	18	51	91	39	118	45
CAC3	59	86	79	8	52	46	84	34	17	64	96	47	135	36
CAC4	61	94	81	4	56	51	99	39	20	74	167	51	105	27
CAC5	69	96	87	11	39	49	89	22	13	80	128	33	91	31
CAC6	71	112	89	9	29	29	114	31	14	82	139	29	76	28
CAL1	70	111	123	36	8	72	98	65	43	78	147	74	121	68
CAL2	79	143	103	49	26	73	95	47	25	110	143	54	85	58
CUE1	13	41	22	31	45	3	40	45	27	16	71	45	48	4
FRA1	47	68	54	80	98	33	6	119	85	37	37	91	5	61
FRA2	57	99	85	112	105	54	7	109	99	38	45	131	4	54
GIB1	68	92	102	32	66	39	104	5	27	76	102	29	133	62
GIB2	78	114	102	32	44	68	116	9	25	100	102	30	123	64
GIB3	83	97	69	31	46	58	109	4	28	61	98	29	134	38
HOL1	41	86	51	15	44	30	84	32	6	45	96	29	97	33
HOL2	63	81	71	18	36	46	109	21	4	74	99	34	77	42
HOL3	39	97	57	14	25	36	106	27	9	79	117	24	97	37
HOL4	56	101	47	18	33	48	83	23	3	60	146	24	74	34
HOL5	56	88	79	14	36	35	73	30	7	75	153	25	68	39
HOL6	69	78	56	18	32	44	108	29	3	63	150	38	121	41
MA1	30	66	37	82	63	18	38	94	77	12	47	113	27	18
MA2	15	43	29	86	107	17	33	63	42	15	88	105	54	34
MA3	28	54	39	76	85	18	34	60	43	12	79	101	35	28
MA4	24	70	25	68	106	15	32	78	44	16	79	85	35	34
MA5	30	57	38	83	68	25	24	82	45	7	47	66	36	24
MA6	23	67	39	68	89	19	33	71	64	13	85	79	40	26
MA7	22	63	41	43	93	23	42	60	62	9	88	63	45	19
MOA1	69	152	103	112	178	67	35	112	122	80	17	118	20	66
MOA2	98	89	114	123	184	78	31	178	160	79	20	160	22	77
MOA3	78	160	134	127	110	60	27	157	91	71	9	130	35	65
RAF1	77	98	80	47	79	53	124	27	40	63	174	16	160	42
RAF2	53	109	65	43	63	73	118	36	30	87	105	9	138	63
RAF3	102	82	80	27	45	41	133	33	36	84	107	10	92	51
RAF4	63	150	64	27	76	43	132	29	39	107	108	25	141	64
RAF5	58	100	93	47	55	70	137	22	24	102	180	33	91	67
SAG1	64	76	97	74	113	64	5	103	70	32	29	135	5	49
SAG2	71	108	92	93	139	72	8	90	115	38	22	122	2	78
URB1	17	40	29	37	48	5	45	46	39	26	80	48	87	4