

Revisión del estado del arte en modelos de localización y relocalización de vehículos para atención de emergencias

Oscar Javier Parra Ortega*

Politécnico Grancolombiano

FECHA DE RECEPCIÓN: JUNIO 19 DE 2010

FECHA DE APROBACIÓN: NOVIEMBRE 26 DE 2010

Resumen El presente artículo hace una revisión del estado del arte en modelos para la localización y relocalización de vehículos para la atención de emergencias entre los cuales se encuentran los sistemas de atención de emergencias médicas, de reparación de fallas en la prestación de servicios públicos, y de control de incendios. Este artículo organiza el trabajo existente en dicho campo, basándose en el enfoque de modelaje utilizado, y presentando de forma cronológica el desarrollo de cada enfoque. Como complemento a los trabajos de corte analítico, se reseñan adicionalmente los artículos orientados a aplicaciones y estudios de caso, desarrollados hasta el momento.

Abstract This paper is a review of the state of the art in location and relocation models of emergency vehicles, which include the emergency medical systems, public services maintenance systems and fire departments. Also includes the existing work in this subject, based on the modeling approach used, and presented in chronological order. To complement the analytical works, another application-oriented articles and case studies developed so far are reviewed in this article.

Palabras Clave: modelos de localización, servicios para atención de emergencias.

Keywords: location models, emergency systems.

* Docente de Planta. Ingeniero Industrial Universidad Industrial de Santander. Director del grupo de investigación Métodos Cuantitativos e Investigación Operativa. oparraor@poligran.edu.co. El proyecto de investigación del cual es producto este documento, ha sido financiado por la Fundación Politécnico Grancolombiano, mediante el contrato de investigación No: 2010-FICB-MCIO-TC-16, del 14 de diciembre de 2009.

1. Introducción

Los sistemas de atención de fallas en las ESP (Empresas de Servicios Públicos), así como los sistemas de respuesta a emergencias médicas EMS (*Emergency Medical Services*) son componentes esenciales en la infraestructura de toda área urbana o rural. Su adecuado funcionamiento garantiza el pronto reestablecimiento de la prestación de servicios esenciales, en el caso de las ESP, y es crítico para incrementar las probabilidades de supervivencia de los pacientes a atender en el caso de las EMS. En ambos casos, quienes gestionan dichos sistemas deben tomar decisiones relacionadas con:

- El número y tipo de vehículos a utilizar a lo largo de la red.
- La localización de los puntos desde los cuales despachan los vehículos para la atención de fallas o emergencias.
- La regla de asignación para el despacho de vehículos cuando se presenta una emergencia o una falla.
- La relocalización de los recursos cuando una zona se encuentra desatendida por efecto del despacho de las unidades que allí operan.

Este proceso de decisión influye directamente en el tiempo de respuesta del sistema para llegar al punto de demanda (dónde se ha presentado o reportado la falla, o dónde se encuentra el paciente en el caso de las emergencias médicas).

Adicionalmente, el proceso de localización y relocalización de móviles se hace más complejo día a día, ya que la demanda se va incrementando proporcionalmente con el cambio demográfico del área a la que se ofrece cobertura con dichos servicios [62].

En las últimas cuatro décadas se han realizado estudios tendientes al modelaje y diseño de herramientas para la localización y relocalización de equipos para la atención de emergencias, principalmente asociados con la gestión y operación de EMS y, en menor medida, con sistemas de atención a incendios (*Fire Systems*) y de atención de fallas en ESP.

La intención de este artículo es, por una parte, dar una visión global de los enfoques existentes en la literatura desde el punto de vista analítico, y por otra parte, enunciar los casos más relevantes en los cuales se han aplicado exitosamente las herramientas de *OR* en la toma de decisiones para el proceso de localización y relocalización de móviles.

2. Descripción básica de la operación de un ESVS

Un ESVS (*Emergency Service Vehicle System*), independientemente de si está dedicado a la reparación de fallas de servicios públicos, o a la atención de emergencias médicas o incendios, presenta el siguiente mecanismo de operación:

1. Reporte o detección del incidente, de forma automática, o a través de una llamada a una línea de emergencia.
2. Valoración de la severidad del incidente.

3. Asignación de un vehículo y despacho del mismo al punto del incidente.
4. Atención del incidente.
5. Retorno del vehículo a la estación de origen, en espera de un nuevo servicio [13].

3. Modelaje de un ESVS

Desde el punto de vista de los modelos en investigación de operaciones, los ESVS tienen como objetivo primario garantizar la atención de la mayor proporción de incidentes dentro de un tiempo establecido.

Para simplificar el análisis de este tipo de sistemas, se suele agregar la demanda en zonas, de forma que los tiempos de atención de un incidente son calculados desde la estación que despacha un vehículo hasta el centro de la zona donde ocurre el incidente. De la misma forma, se suele categorizar el resultado del proceso de atención de los incidentes de acuerdo con un tiempo de referencia conocido como tiempo estándar. Si el vehículo llega al punto del incidente en un tiempo inferior a T_s , se considera que dicho servicio fue exitoso.

Según el tipo de función objetivo bajo el cual operan, los modelos de localización y relocalización pueden estar orientados a:

1. Minimizar el tiempo de atención (promedio o total) de la totalidad de los incidentes por período de tiempo.
2. Minimizar el tiempo máximo de atención hacia cualquier incidente.
3. Maximizar el área cubierta en un tiempo inferior, al tiempo determinado como estándar (T_s), o
4. Maximizar el número de incidentes atendidos en un tiempo inferior, al tiempo determinado como estándar.

En algunas ocasiones se utiliza una combinación de estos criterios de decisión para obtener la configuración más apropiada para el EMS [5].

De acuerdo con la categoría de gravedad del incidente, se define un valor diferente de T_s para cada categoría. Por ejemplo, la USEMSA (*United States Emergency Medical Services Act*) establece como estándar que en áreas urbanas de los Estados Unidos, el 95 % de las emergencias médicas sean atendidas en un lapso inferior a 10 minutos [6]. Cabe resaltar que en el caso especial de los EMS suelen existir dos tipos de equipos para la atención de incidentes, de acuerdo con la gravedad de los mismos, definidos como unidades básicas de soporte de vida BLS (*Basic Life Support*) y unidades avanzadas de soporte de vida ALS (*Advanced Life Support*) [50].

Otros criterios para el modelaje de la función – objetivo pueden incluirse en el análisis del desempeño de los ESVS:

1. Maximización del balance en cobertura: es clave garantizar que no haya un desequilibrio entre el nivel de servicio de zonas al interior del ESVS, teniendo en cuenta que el nivel de servicio es medido como la proporción de incidentes atendidos en un tiempo inferior a T_s [54].

2. Minimización de costos: dicha función de costos suele incluir los componentes fijos de adquisición de los vehículos, e instalación y operación de las estaciones, así como los costos variables de mano de obra de los equipos de atención [61].

4. Categorización de los modelos analíticos de localización y relocalización

Una vez definidos los componentes básicos de los modelos en investigación de operaciones, asociados con la localización y relocalización de vehículos, vale la pena resaltar que el modelaje de estos problemas ha evolucionado de la mano con las herramientas disponibles para la implementación de los modelos propuestos. Conforme fueron apareciendo mejores herramientas para el desarrollo de algoritmos de búsqueda, tales como la ‘búsqueda Tabú’ [35], la formulación de los modelos de localización fue aproximándose más a la naturaleza dinámica del comportamiento de los ESVS.

A continuación se enuncian los principales componentes que presentan modificaciones en la formulación de modelos de localización y relocalización, y que a su vez sirven como criterios de categorización.

1. *Disponibilidad de los vehículos a través del tiempo:*
 - (a) Modelos determinísticos: aquellos en los cuáles se modela el recurso llamado vehículos como un parámetro con disponibilidad del 100% al momento en que se reporta un incidente. Estos modelos no tienen en cuenta el hecho de que la cobertura de un área se pierde parcialmente cuando un vehículo es despachado a atender un incidente.
 - (b) Modelos probabilísticos estáticos: en estos modelos, los vehículos pueden o no estar disponibles, ya que son modelados como servidores en un sistema de colas. Al sistema van ingresando llamadas o reportes de incidentes que son asignados a otros servidores disponibles en el sistema, si es que el servidor (vehículo a despachar) por defecto, se encuentra ocupado.
 - (c) Modelos dinámicos: son más recientes, y se enfocan en resolver el problema de relocalizar a los vehículos conforme algunas zonas han quedado sin cobertura en el momento que el vehículo es ocupado por un incidente en progreso.
2. *Función objetivo:* los modelos pueden variar respecto a la función objetivo a utilizar, tal como se describió en la función anterior o si utilizan una función multi-criterio o no.
3. *Restricciones asociadas con el número de vehículos por estación de localización:* en los primeros modelos, se partía del supuesto de que cada punto de origen (estación o base) solo podría tener asignado un vehículo. Sin embargo, modelos más recientes tienen en cuenta la posibilidad de asignar uno o más vehículos de acuerdo con el uso de cotas sobre el número de vehículos por estación.
4. *Restricciones asociadas con la cobertura:* mientras que algunos modelos utilizan el mismo criterio de cobertura para todas las zonas que componen el

ESVS, otros modelos más recientes aplican criterios diferentes de cobertura para zonas con distinta prioridad de atención al interior del ESVS.

5. *Cantidad disponible y tipos de vehículos*: la cantidad de vehículos puede ser constante o estar acotada. En algunos modelos propuestos, se utiliza más de un tipo de vehículo de acuerdo con las velocidades de los mismos y al tipo de incidente que están en capacidad de atender.

4.1. Modelo LSCM [64]

El modelo de cobertura de conjuntos de locaciones (*Location Set Covering Model*) es uno de los primeros modelos de grafos propuestos para la localización de vehículos en un ESVS. Tiene como función – objetivo minimizar el número de móviles o vehículos requeridos para cubrir todos los puntos de demanda. Cuenta con dos conjuntos principales de restricciones:

- Todo punto de demanda tiene asignada al menos una estación.
- Toda estación tiene asignado a lo sumo un vehículo.

Adicionalmente, este modelo tiene una cota inferior sobre el número de vehículos requeridos para alcanzar cobertura total.

Entre sus debilidades principales se resalta que es un modelo determinístico (no tiene en cuenta la demanda desatendida que se genera al despachar un vehículo) y que al agregar la demanda en forma discreta se pueden generar varios tipos de errores, producto de la pérdida de precisión. Respecto a esta pérdida de precisión, los errores que este tipo de agregación en las zonas de demanda, pueden generar:

1. **Errores tipo A**: errores en el cálculo de distancias, causadas al ubicar erróneamente el punto de ocurrencia de un incidente.
2. **Errores tipo B**: errores en el cálculo de distancias, causadas al ubicar erróneamente la ubicación de una estación.
3. **Errores tipo C**: errores en la asignación de vehículos a incidentes [39].

Si bien estos errores suelen afectar los resultados de los modelos de demanda agregada, cada vez se requiere menos agregación en los datos a utilizar. Sin embargo para los casos en los cuáles sea requerido modelar la demanda de forma agregada, existen técnicas orientadas a reducir la incidencia de estos errores en los resultados de los modelos de localización [27], así como procedimientos para eliminar dichos errores, dadas ciertas condiciones sobre el tipo de función objetivo a utilizar [21].

Finalmente, se cita el trabajo [29] asociado con la obtención de cotas para los errores asociados con la agregación de la demanda en diversos modelos de localización. Una aplicación de este modelo puede encontrarse en [41], donde se alcanza una reducción de 200 a 145 vehículos en la mejor solución obtenida.

4.2. Modelo MCLP [19]

Mientras el modelo LSCM busca calcular el mínimo número requerido de móviles para operar, el problema de localización con cobertura máxima (*Maximal Covering Location Problem*) aborda el problema de maximizar la cobertura alcanzada para cada uno de los puntos de demanda, teniendo como parámetro del problema el número disponible de móviles (p) a asignar. Adicionalmente, este modelo mejora la formulación del problema al asignar un peso o demanda relativa a cada punto de demanda, de forma que se tiene en cuenta que algunas zonas agregadas pueden presentar un mayor número de incidentes. En este modelo se elimina la restricción de cubrir el 100% de los puntos de demanda, ya que esto depende del valor de p . Para solucionar esto, una variación de este modelo consiste en incrementar gradualmente el valor de p hasta alcanzar un 100% de cobertura.

En varios estudios de caso, se muestran los beneficios de la implementación del modelo MCLP tanto en la reducción de costos fijos y variables [24] como en la reducción del tiempo promedio de atención de emergencias en EMS [25]. Entre ellos, se resalta el trabajo [17], en el cual se compilan diversas implementaciones del modelo MCLP.

4.3. Modelo TEAM [63]

Uno de los inconvenientes de los modelos LSCM y MCLP reside en la restricción para manejar solo una categoría de vehículos y de tipos de incidentes. En muchas ocasiones, dependiendo del tipo de incidente, es enviado un tipo diferente de vehículo. En otras ocasiones, dos tipos diferentes de vehículos son requeridos en el lugar del accidente, con tiempos estándar diferentes para cada uno (tal como sucede con los EMS en los cuales un equipo primario BLS llega al lugar del accidente, mientras que un segundo equipo ALS va en camino para dar atención más específica).

El *Tandem Equipment Allocation Model* (TEAM) se basa en el MCLP, con la diferencia de que existe un conjunto de variables adicionales para el segundo tipo de vehículos. Por lo tanto, un punto de demanda no se considera cubierto si no hay disponible un vehículo de cada tipo para atenderlo dentro del tiempo estándar asignado para cada categoría. Años más tarde, una versión ampliada de este modelo, se propuso para ser aplicada en sistemas de atención de incendios con dos categorías de vehículos [51]. En [48] se describe la aplicación del modelo TEAM para una red de transporte de desechos radioactivos (*Waste Isolation Project Facility*).

4.4. Modelo FLEET [63]

El modelo *Facility Location Equipment Emplacement Technique* (FLEET) es una derivación del modelo TEAM, en la cual se agrega la decisión de seleccionar las instalaciones para la ubicación de las estaciones, junto con la selección de los vehículos a asignar en las instalaciones definidas. Este modelo no presenta ninguna relación de jerarquía entre los tipos de vehículos a asignar en las distintas

estaciones. De esta forma, una estación seleccionada puede tener asignado un vehículo de una sola categoría o un tandem de vehículos de cada tipo, según sea el caso. Tal como se menciona en el artículo [10], este modelo fue aplicado a un conjunto de datos en Austin, Texas.

4.5. Modelo MCLP multiobjetivo (HOSC) [23]

Este modelo es el primero que incorpora las ventajas de la programación jerárquica y multi-objetivo en el modelo básico MCLP, ya que propone:

1. Minimizar el número requerido de vehículos para alcanzar la cobertura deseada, y
2. Dado el número de vehículos disponibles, maximizar la cobertura múltiple de los puntos de demanda.

De esta forma, se obtienen mejores resultados que con el modelo MCLP bajo condiciones de alta congestión. Esto se logra al maximizar el número de puntos cubiertos por más de un vehículo. Si en un estado de congestión, el vehículo idóneo para atender un incidente está ocupado, el segundo vehículo que cubre dicho punto podrá atender el incidente. El modelo así propuesto se conoce como *Hierarchical Objective Set Covering*.

En [23] se muestra la implementación del modelo HOSC para una instancia de 33 zonas en el sistema de atención de emergencias en Austin, Texas.

4.6. Modelo MEXCLP [22]

Es una extensión del modelo HOSC en el cual se incluye y se simplifica el cálculo de la probabilidad de que un vehículo esté ocupado, utilizando un supuesto de independencia en la operación de los vehículos en el sistema. Además de proponer una heurística para la localización de los móviles, se analiza el efecto del cambio en el número de vehículos disponibles, sobre la cobertura de la demanda. Su importancia radica en la inclusión del componente probabilístico en el modelo propuesto.

En cuanto a las aplicaciones del modelo MEXCLP (*Maximal Expected Covering Location Problem*), se resalta la implementación del mismo en la ciudad de Bangkok [30], así como la inclusión de la variabilidad en los tiempos de viaje, en el diseño de un EMS en Tucson, Arizona [37].

En cuanto a otras variaciones de este modelo, se encuentra el TIMEXCLP, el cual incluye el efecto de la variación de la velocidad de desplazamiento a lo largo del día, y es evaluada bajo un entorno de simulación [58]; así como el AMEXCLP o MEXCLP ajustado [9] en el cual se aplica un factor de ajuste a la función –objetivo, para tener en cuenta el hecho de que los vehículos de emergencia no operan de forma independiente. Otra variación propuesta para los modelos SCLM y MCLP tiene en cuenta que muchas veces se requiere más de un vehículo para atender un reporte de emergencia en un punto de demanda [8]. Esta variación se conoce como MLLSCP o *Multi Level Location Set Covering*, y también es analizada en [18].

4.7. Modelos BACOP1 & BACOP2 multiobjetivo [40]

Estos modelos pueden ser vistos como una combinación de los modelos LSCM y MCLP, en los cuales se agrega a la función – objetivo inicial, una segunda función objetivo que busca maximizar el número de vehículos que estén dentro del tiempo máximo de atención de los puntos de demanda. Con esto, se apunta al objetivo de proteger al sistema de variaciones en la demanda al maximizar la cobertura de respaldo de los puntos de demanda. Este modelo se conoce como *Backup Coverage Model*.

Una extensión de este modelo, donde se aplican técnicas de programación por objetivos, puede encontrarse en [3]. En esta formulación, se busca minimizar los costos de operación y de instalación, así como la distancia a recorrer, a la vez que se maximiza la cobertura de demanda. En [26] se implementa una variación de los modelos LSCP y MCLP, que incluyen los conceptos básicos de los modelos BACOP.

4.8. Modelos MALP I & MALP II [61]

Consisten en dos versiones de un modelo probabilístico que busca maximizar la cobertura de demanda, con una probabilidad α . Este modelo estima la fracción de ocupación de cada estación y, con base en dicha estimación, efectúa la localización de un número dado de vehículos.

Mientras que el modelo MALP I asume que la fracción de tiempo ocupado es la misma para todos los móviles, el modelo MALP II relaja esta restricción. En [43] se hace una crítica a la implementación de este tipo de modelos, dadas las dificultades técnicas encontradas al aplicarlos con datos pertenecientes a sistemas reales.

4.9. Modelo Rel-P [6]

Como complemento al modelo LSCM, este modelo busca minimizar los costos fijos asociados con el conjunto de vehículos requeridos por el sistema. Entre sus restricciones y variaciones sobre los modelos previamente enunciados, se resalta la posibilidad de ubicar más de un vehículo en una misma estación. El componente probabilístico de este modelo está orientado a asegurar que las llamadas sean atendidas con una probabilidad α dada. En [6] también se describe en detalle la implementación de dicho modelo, así como los resultados computacionales obtenidos.

4.10. Modelo DDSM [34]

Este modelo responde al problema de relocalización de vehículos que ya había sido detectado en un trabajo previo [44], en el cual se encontró que cuando un móvil es enviado a atender un incidente debe realizarse un proceso de relocalización para mantener la cobertura en todas las zonas. La diferencia con el problema inicial de localización reside en que este procedimiento es dinámico, y se debe

llevar a cabo de forma periódica conforme los vehículos son despachados y dejan zonas sin cobertura al movilizarse a los incidentes asignados. Uno de los enfoques que se puede asumir para este problema de relocalización, consiste en resolver continuamente y en tiempo real, problemas de localización para reasignar los vehículos disponibles.

Otro enfoque, propuesto por Gendreau [33], consiste en utilizar un algoritmo heurístico de ‘búsqueda Tabú’ para maximizar la demanda cubierta al menos dos veces, teniendo en cuenta unas penalizaciones por efecto de la relocalización de los móviles. Dichas penalizaciones buscan evitar que se movilen vehículos hacia otras estaciones que estén demasiado alejadas o que se efectúen bucles sucesivos de vehículos entre las mismas dos estaciones.

La implementación de este modelo conocido como *Dynamic Double Standard Model* (DDSM), permite que el sistema se anticipe al despacho del siguiente vehículo para que el proceso de relocalización se pueda ejecutar de forma simultánea con la atención de una llamada o reporte entrante. Se diferencia de su predecesor, el *Double Standard Model* (DSM), en que el proceso se hace de forma dinámica incluyendo las penalizaciones por relocalización.

Finalmente, en [45], describen una implementación del modelo DDSM en la isla de Montreal. También mencionan la implementación del modelo estático DSM en conjuntos de datos de Montreal, Austria, y Wallonie.

5. Enfoque descriptivo basado en la teoría de colas

Mientras que los anteriores modelos han abordado el problema desde el punto de vista determinístico o probabilístico con base en la formulación matemática de un problema de optimización, otros autores han hecho un análisis descriptivo de los ESVS como sistemas de colas para obtener expresiones que permitan el cálculo de diversas medidas de desempeño de dichos sistemas. Entre ellos se resalta la formulación del modelo ‘hipercubo de colas’ [46], junto con un procedimiento propuesto para implementarlo [47], y una implementación de una variación de dicho modelo en el EMS de Greenville County, Carolina del Sur [14]. Otras implementaciones del *Hypercube Queueing Model* se encuentran en [52,55,42].

En esta categoría también se encuentra una variación de tipo probabilístico del LSCM, conocida como *Queueing Probabilistic Location Set Covering Problem* o Q-PLSCP, en la cual el número de servidores requeridos para atender determinado punto de demanda, se calcula teniendo en cuenta la probabilidad de que los servidores que están atendiendo dicho punto estén ocupados, esta variación permite modelar su comportamiento como un sistema de colas [53], así como una variación del mismo, conocida como Q-RLSCP o *Queueing Probabilistic Location Set Covering Problem*, [11], en la cual se combina el concepto de confiabilidad mínima para atender cada punto de demanda con la probabilidad de que una llamada no pueda ser atendida en caso de congestión del EMS.

6. Técnicas meta-heurísticas y modelos de simulación

En ocasiones, dada la complejidad del problema, o el tamaño del mismo en términos del número de puntos de demanda y posibles estaciones de despacho, se determina que un modelo de optimización no es la herramienta más apropiada para resolver dicho problema. Esto se resalta especialmente en el caso en el que el tiempo para obtener una solución aproximada es determinante a la hora de seleccionar la herramienta a implementar [4].

En este campo, vale la pena mencionar la implementación de un modelo de simulación en conjunto con una rutina meta-heurística para resolver el problema de localización de ambulancias en la ciudad de Austin, Texas [28]. Se resalta que el uso de meta-heurísticas puede incrementar el grado de realismo del modelo implementado, respecto a los modelos de optimización determinísticos.

También se encuentra el trabajo realizado en [31], en el cual se implementa el modelo MCLP, a partir de una heurística de relajación lagrangiana, con el fin de obtener mejores aproximaciones a la solución del MCLP, en especial para instancias de mayor tamaño.

7. Otros artículos de revisión sobre modelos de localización

Entre los principales artículos que han reseñado el estado del arte en modelos de localización, se encuentran tanto trabajos orientados hacia todo tipo de problema de localización, incluido el diseño de redes y la localización de bodegas [12], así como otros orientados al problema específico de localización de servicios de emergencias [59] y, en especial, el de la localización de estaciones de bomberos y ambulancias [60]. Igualmente se resaltan los trabajos [38,15,13,36] en el área de revisión de modelos de localización.

8. Investigaciones y estudios de caso más recientes

A continuación se enuncian los contenidos de otras investigaciones más recientes, asociadas con la formulación y/o implementación de modelos asociados con el problema de localización en ESVS.

8.1. Weintraub, Aboud, Fernández, Laporte, Ramírez, 1999 [65]

Este artículo se resalta, ya que es la única implementación asociada directamente con la atención de fallas en un sistema de distribución de energía eléctrica, disponible en la literatura. En este caso se aplica una modificación del método GENI propuesto en [32] para localizar la flota de vehículos de *Emergency Services Division of Chilectra S.A.*

8.2. Church, Scaparra, Middleton, 2004 [20]

En este artículo se proponen dos modelos (*r-interdiction median*, y *r-interdiction coverage*) para identificar cuáles son las instalaciones o vehículos más críticos y relevantes en el funcionamiento de un EMS. También se analiza el efecto de la pérdida de uno de estos recursos críticos en la eficiencia y cobertura del sistema.

8.3. Alsalloum, Rand, 2003 & Alsalloum, Rand, 2006 [2,1]

Se propone un modelo de programación por objetivos para determinar el mínimo número de vehículos requeridos para la atención de emergencias en Riyadh City, Arabia Saudita, así como la localización de los mismos, con un componente probabilístico en la cobertura de los puntos de demanda.

8.4. Liu, Huang, Chandramouli, 2006 [49]

En este estudio se aplica un algoritmo de ‘colonia de hormigas’, en conjunto con el uso de GIS (*Geographic Information System*) para localizar estaciones de bomberos en función de las rutas autorizadas para el transporte de HAZMAT (*Hazardous Materials*) en la Ciudad de Singapur.

8.5. Monarchi, Hendrick, Plane, 2007 [56]

Este estudio compara los resultados de un modelo de simulación *versus* la formulación de modelos clásicos de localización para la configuración de un sistema de control de incendios en Nueva York.

8.6. Cheu, Huang, Huang, 2008 [16]

Se propone una variación del modelo propuesto por ReVelle y Snyder (conocido como FAST - *Fire and Ambulance Service Technique*), y se valida su eficacia con base en la simulación del comportamiento del sistema de atención de incendios en la ciudad de Singapur.

8.7. Murray, Matisziw, Wei, Tong, 2008 [57]

En este artículo se formula un modelo para maximizar la cobertura del espacio continuo, y su implementación a partir de un heurístico geocomputacional es comparada en términos de cobertura *versus* un procedimiento MCLP.

8.8. Batanovic, Petrovic, Petrovic, 2009 [7]

Este trabajo está orientado a la implementación de herramientas de cobertura para la localización de instalaciones, aplicando herramientas de lógica difusa para modelar la incertidumbre en los tiempos de desplazamiento entre nodos de la red.

8.9. Sasaki, Comber, Suzuki, Brunson, 2010 [62]

Se complementa el uso de algoritmos ‘genéticos’ para la localización actual de móviles en un EMS, junto con un pronóstico del crecimiento de la demanda futura para evaluar la localización potencial de los vehículos de emergencias bajo el escenario proyectado en la prefectura de Niigata, Japón.

9. Tendencias en trabajos futuros

La cantidad de trabajos analíticos existentes sobre el tema de localización de vehículos sugiere que el área donde se requiere mayor trabajo en la actualidad y hacia futuro, es en la implementación de estas herramientas para el tratamiento de problemas de localización y relocalización en tiempo real. Transferir los conocimientos sobre este tipo de modelos hacia su implementación en sistemas de atención de emergencias es una labor que apenas inicia, y que tiene un potencial sustancial en el futuro cercano. No solamente por la reducción obtenida en los costos de operar dichos sistemas, sino por el incremento en la cobertura y la mejora en los tiempos de atención que se podrían alcanzar si se utilizan herramientas de apoyo para la toma de decisiones, como las enunciadas en este artículo. La bibliografía listada a continuación representa y resume en gran mayoría el trabajo desarrollado durante los últimos 40 años en la formulación y aplicación de modelos de localización, y es un punto de partida para profundizar más en este tema.

Referencias

1. Alsalloum, O. I., Rand, G. K.: A goal-programming model applied to EMS system at Riyadh City, Saudi Arabia. Lancaster, UK: Lancaster University Management School. (2003)
2. Alsalloum, O. I., Rand, G. K.: Extensions to emergency vehicle location models. *Computers Operations Research*, 33 (9), 2725-2743. (2006)
3. Badri, M. A., Mortagy, A. K., Alsayed, C. A.: A multiobjective model for locating fire stations. *European Journal of Operational Research*, 110 (2), 243-260. (1998)
4. Baker, D., Byrd, J.: A lesson in timing: a nonemergency solution to an emergency service decision. *Interfaces*, 10 (3), 30-33. (1980)
5. Baker, J. R., Clayton, E. R., Taylor, B. W.: A Non-Linear Multi-Criteria Programming Approach for Determining County Emergency Medical Service Ambulance Allocations. *The Journal of the Operational Research Society*, 40 (5), 423-432. (1989)
6. Ball, M. O., Lin, F. L.: A reliability model applied to emergency vehicle location. *Operations Research*, 41 (1), 18-36. (1993)
7. Batanovic, V., Petrovic, D., Petrovic, R.: Fuzzy logic based algorithms for maximum covering location problems. *Information Sciences*, 179, 120-129. (2009)
8. Batta, R., Mannur, N. R.: Covering-location models for emergency situations that require multiple response units. *Management Science*, 36 (1), 16-23. (1990)
9. Batta, R., Dolan, J., Krishnamurthy, N. N.: The Maximal Expected Covering Location Problem Revisited. *Transportation Science*, 23 (4), 277-287. (1989)

10. Bianchi, G., Church, R.: A heuristic for a hybrid FLEET model. *Computers & Operations Research*, 17 (5), 481-494. (1990)
11. Borrás, F., Pastor, J.: The ex-post evaluation of the minimum local reliability level: an enhanced probabilistic location set model. *Annals of Operations Research*, 111 (1), 51-74. (2002)
12. Brandeau, M., Chiu, S. S.: An Overview Of Representative Problems In Location Research. *Management Science*, 35 (6), 645-674. (1989).
13. Brotcorne, L., Laporte, G., Semet, F.: Ambulance location and relocation models. *European Journal of Operational Research*, 147, 451-463. (2003)
14. Burwell, T. H., McKnew, M. A., Jarvis, J. P.: An application of a spatially distributed queuing model to an ambulance system. *Socio-Economic Planning Sciences*, 26 (4), 289-300. (1992)
15. Caccetta, L., Dzator, M.: Models for the location of emergency facilities. The Modelling and Simulation Society of Australia, 2149-2154. New Zealand: MSSANZ. (2001)
16. Cheu, R., Huang, Y., Huang, B.: Allocating emergency service vehicles to serve critical transportation infrastructures. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 12 (1), 38-49. (2008)
17. Chung, C. H.: Recent Applications of the Maximal Covering Location Planning (M.C.L.P.) Model. *The Journal of the Operational Research Society*, 37 (8), 735-746. (1986)
18. Church, R. L., Gerrard, R. A.: The Multi-level Location Set Covering Model. *Geographical Analysis*, 35 (4), 277-289. (2003)
19. Church, R. L., ReVelle, C.: The maximal covering location problem. *Papers in Regional Science*, 32 (1), 101-118. (1974)
20. Church, R., Scaparra, M. P., Middleton, R. S.: Identifying Critical Infrastructure: The Median and Covering Facility Interdiction Problems. *Annals of the Association of American Geographers*, 94 (3), 491-502. (2004)
21. Current, J., Ratick, S., ReVelle, C.: Dynamic facility location when the total number of facilities is uncertain: A decision analysis approach. *European Journal of Operational Research*, 110 (3), 597-609. (1997)
22. Daskin, M. S.: A maximum expected covering location model Formulation, properties and heuristic solution. *Transportation Science*, 17 (1), 48-70. (1983)
23. Daskin, M. S., Stern, E. H.: A hierarchical objective set covering model for emergency medical service vehicle deployment. *Transportation Science*, 15 (2), 137-152. (1981)
24. Eaton, D. J., Daskin, M. S., Simmons, D., Bulloch, B., Jansma, G.: Determining emergency medical deployment in Austin, Texas. *Interfaces*, 15 (1), 96-108. (1985)
25. Eaton, D., Sanchez, U., Hector, M., Lantigua, R. R., Morgan, J.: Determining Ambulance Deployment in Santo Domingo, Dominican Republic. *The Journal of the Operational Research Society*, 37 (2), 113-126. (1986)
26. Erdemir, E., Rajan, B., Rogerson, P., Alan, B.: Joint ground and air emergency medical services coverage models: A greedy heuristic solution approach. *European Journal of Operational Research*, 2 (1), 736-749. (2010)
27. Erkut, E., Bozkaya, B.: Analysis of aggregation errors for the p-median problem. *Computers Operations Research*, 26, 1075-1096. (1999)
28. Fitzsimmons, J. A., Srikar, B. N.: Emergency ambulance location using the contiguous zone search routine. *Journal of Operations Management*, 2 (4), 225-237. (1982)
29. Francis, R. L., Lowe, T. J., Tamir, A.: Aggregation error bounds for a class of location models. *Operation Research*, 48 (2), 294-307. (2000)

30. Fujiwara, O., Makjamroen, T., Gupta, K. K.: Ambulance deployment analysis: A case study of Bangkok. *European Journal of Operational Research*, 31 (1), 9-18. (1987)
31. Galvao, R. D., ReVelle, C.: A Lagrangean heuristic for the maximal covering location problem. *European Journal of Operational Research*, 88, 114-123. (1996)
32. Gendreau, M., Hertz, A., Laporte, G.: New Insertion and Postoptimization Procedures for the Traveling Salesman Problem. *Operations Research*, 40 (6), 1086-1094. (1992)
33. Gendreau, M., Laporte, G., Semet, F.: A dynamic model and parallel tabu search heuristic for real-time ambulance relocation. *Parallel Computing*, 27, 1641-1653. (2001)
34. Gendreau, M., Laporte, G., Semet, F.: Solving an ambulance location model by tabu search. *Location Science*, 5 (2), 75-88. (1997)
35. Glover, F., Laguna, M.: *Tabu Search*. Boston: Kluwer. (1997)
36. Goldberg, J. B.: *Operations Research Models for the Deployment of Emergency Services Vehicles*. *EMS Management Science*, 1 (1), 20-39. (2004)
37. Goldberg, J., Dietrich, R., Chen, J. M., Mitwasi, G., Valenzuela, T., Criss, E.: Validating and applying a model for locating emergency medical vehicles in Tucson, AZ. *European Journal Of Operational Research*, 49 (3), 308-324. (1990)
38. Hesse-Owen, S., Daskin, M. S.: Strategic facility location A review. *European Journal of Operational Research*, 111 (3), 423-447. (1998)
39. Hillsman, E., Rhoda, R.: Errors in measuring distances from population to service centers. *Annals of Regional Science*, 12, 74-88. (1978)
40. Hogan, K., ReVelle, C.: Concepts and applications of backup coverage. *Management Science*, 32 (11), 1434-1444. (1986)
41. Hong, J., Yeong, Y.: *Application Of The Set-Covering Model For The Minimum Cost Transportation Problem*. (2008)
42. Iannoni, A. P., Morabito, R.: A multiple dispatch and partial backup hypercube queuing model to analyze emergency medical systems on highways. *Transportation Research*, 43, 755-771. (2007)
43. Ingolfsson, A., Budge, E., Erkut, E.: Optimal ambulance location with random delays and travel times. *Health Care Management Science*, 11 (3), 262-274. (2007)
44. Kolesar, P., Walker, W. E.: An algorithm for the dynamic relocation of fire companies. *Operations Research*, 22 (2), 249-274. (1975).
45. Laporte, G., Louveaux, F., Frédéric, S., Thirion, A.: Application of the Double Standard Model for Ambulance Location. *Innovations In Distribution Logistics*, 619,235-249. (2009)
46. Larson, R.: A hypercube queuing model for facility location and re-sub-areaing in urban emergency services. *Computers and Operations Research*, 1 (1), 67-95. (1974)
47. Larson, R.: Approximating the performance of urban emergency service system. *Operations Research*, 23 (5), 845-868. (1975)
48. List, G., Turnquist, M.: Routing and Emergency Response Team Siting for High-Level Radioactive Waste Shipments. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 45 (2), 141-152. (1998)
49. Liu, N., Huang, B., Chandramouli, M.: Optimal Siting of Fire Stations Using GIS and ANT Algorithm. *Journal of computing in civil engineering*, 20 (5), 361-369. (2006)
50. Mandell, M.: Covering models for two-tiered emergency medical services systems. *Location Science*, 6 (1-4), 355-368. (1998)

51. Marianov, V., ReVelle, C.: The capacitated standard response fire protection siting problem: Deterministic and probabilistic models. *Annals of Operations Research*, 40 (1), 303-322. (1992)
52. Marianov, V., ReVelle, C.: The Queueing Maximal availability location problem: A model for the siting of emergency vehicles. *European Journal of Operational Research*, 93 (1), 110-120. (1996)
53. Marianov, V., ReVelle, C.: The Queueing Probabilistic Location Set Covering Problem and some Extensions. *Socio-Economic Planning Sciences*, 28 (3), 167-178. (1994)
54. Mars, M., Schilling, D.: Equity Measurement in Facility Location Analysis: A Review and Framework. *European Journal of Operational Research*, 74 (1), 1-17. (1994)
55. Mendonca, F. C., Morabito, R.: Analysing emergency medical service ambulance deployment on a Brazilian highway using the hypercube model. *Journal of the Operational Research Society*, 52, 261-270. (2001)
56. Monarchi, D. E., Hendrick, T. E., Plane, D. R.: Simulation for fire department deployment policy analysis. *Decision Sciences*, 8 (1), 211-227. (2007)
57. Murray, A. T., Matisziw, T. C., Wei, H., Tong, D.: A Geocomputational Heuristic for Coverage Maximization in Service Facility Siting. *Transactions in GIS*, 12 (6), 757-773. (2008)
58. Repede, J., Bernardo, J.: Developing and validating a decision support system for locating emergency medical vehicles in Louisville, Kentucky. *European Journal of Operational Research*, 75 (3), 567-581. (1994)
59. ReVelle, C.: Review, extension and prediction in emergency service siting models. *European Journal of Operational Research*, 40 (1), 58-69. (1989)
60. ReVelle, C.: Siting Ambulances and Fire Companies: New Tools for Planners. *Journal of the American Planning Association*, 57 (4), 471-484. (1991)
61. ReVelle, C., Hogan, K.: The Maximum Availability Location Problem. *Transportation Science*, 23 (3), 192-200. (1989)
62. Sasaki, S., Comber, A., Suzuki, H., Brunsdon, C.: Using genetic algorithms to optimise current and future health planning - the example of ambulance locations. *International Journal of Health Geographics*, 9 (4), 1-10. (2010)
63. Schilling, D., Elzinga, D. J., Cohon, J., Church, R., ReVelle, C.: The TEAM FLEET models for simultaneous facility and equipment siting. *Transportation Science*, 13 (2), 163-174. (1979)
64. Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., Bergman, L.: The Location of Emergency Service Facilities. *Operations Research*, 19 (6), 1363-1373. (1971)
65. Weintraub, A., Aboud, J., Fernández, C., Laporte, G., Ramírez, E.: An emergency vehicle dispatching system for an electric utility in Chile. *Journal of the Operational Research Society*, 50, 690-696. (1999)