

## MEJORAMIENTO DE LA LOCALIZACIÓN DE AMBULANCIAS DE ATENCIÓN PREHOSPITALARIA EN MEDELLÍN (COLOMBIA) CON MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

**Juan G. Villegas R.**

Departamento de Ingeniería Industrial – Facultad de Ingeniería – Universidad de Antioquia  
Calle 70 No. 52 – 21, 050010 – Medellín, Colombia  
[jvillega@udea.edu.co](mailto:jvillega@udea.edu.co)

**Carolina Castañeda P.**

Departamento de Ingeniería Industrial – Facultad de Ingeniería – Universidad de Antioquia  
Calle 70 No. 52 – 21, 050010 – Medellín, Colombia  
[ecacp731@udea.edu.co](mailto:ecacp731@udea.edu.co)

**Katherine A. Blandón**

Departamento de Ingeniería Industrial – Facultad de Ingeniería – Universidad de Antioquia  
Calle 70 No. 52 – 21, 050010 – Medellín, Colombia  
[katherinealejandra.blandon@udea.edu.co](mailto:katherinealejandra.blandon@udea.edu.co)

### RESUMEN

Un aumento pronunciado de los accidentes de tránsito, ha llevado a las autoridades municipales de la ciudad de Medellín (Colombia) a considerar alternativas para mejorar la atención pre-hospitalaria que se le presta a los heridos ocasionados por dichos accidentes. En esta línea, este artículo presenta un modelo de localización desarrollado para determinar la cantidad de ambulancias necesarias para atender las emergencias reportadas al Número Único de Atención de Emergencias 123 (NUSE) y su adecuada localización geográfica. El modelo propuesto está basado en el problema de localización de máxima cobertura esperada (MEXCLP), de manera que se logre maximizar la cobertura poblacional del servicio, de acuerdo con la distribución geográfica y temporal de la demanda estimada con la información histórica. La utilización de dicho modelo permitió evaluar diversos escenarios e identificar diferentes estrategias de mejora para el sistema de atención pre-hospitalaria de la ciudad.

**PALABRAS CLAVE:** Localización de instalaciones, Sistemas de Atención Pre-hospitalaria, modelos de localización de máxima cobertura esperada (MEXCLP).

**Área principal:** ADP - IO en la Administración Pública, SA - OR IO en Salud

### RESUMO

Um aumento acentuado dos acidentes de trânsito tem levado às autoridades municipais da cidade de Medellín (Colômbia) considerar alternativas para melhorar o atendimento pré-hospitalar que é dado aos feridos ocasionados por esses acidentes. Nesse sentido, este artigo apresenta um modelo de localização desenvolvido para determinar a quantidade de ambulâncias necessárias para responder às emergências reportadas ao *Número Único de Atención de Emergencias* 123 (NUSE) e a sua adequada localização. O modelo proposto baseia-se no problema de localização de cobertura máxima desejada (MEXCLP), procurando maximizar a cobertura populacional do serviço, de acordo com a distribuição geográfica e temporal da demanda estimada com informação histórica. A utilização deste modelo permitiu avaliar diferentes cenários e identificar estratégias para melhorar o sistema de atenção pré-hospitalar da cidade.

**PALAVRAS CHAVE: Localização de Instalações, Sistemas de Atendimento Pré-hospitalar, Modelos de Localização de Máxima Cobertura Desejada.**

**Area principal: AdP - PO na Administração Pública, SA - PO na Área de Saúde**

**IMPROVING THE LOCATION OF EMS AMBULANCES IN MEDELLIN (COLOMBIA)  
WITH OPTIMIZATION MODELS**

**ABSTRACT**

The steepest increase in the injuries derived from car crashes have motivated Medellin local authorities to consider alternatives to improve the emergency medical services (EMS) dedicated to serve these injured people. Along this line, this article presents the facility location model used to determine the size of the fleet of ambulances and their appropriate location. In order to maximize the coverage of the population affected by these events (according to the geographical and temporal distribution estimated using the historical data), the proposed model is based on the Maximal Expected Coverage Location Problem (MEXCLP). By using this model it was possible to evaluate different scenarios and to identify strategies for the improvement of the EMS system of the city.

**KEYWORDS: Facility location, Emergency Medical Services –EMS, Maximum Expected Coverage Location Problem (MEXCLP).**

**Main area: AdP - OR in Public Administration, SA - OR in Health**

**1. Introducción**

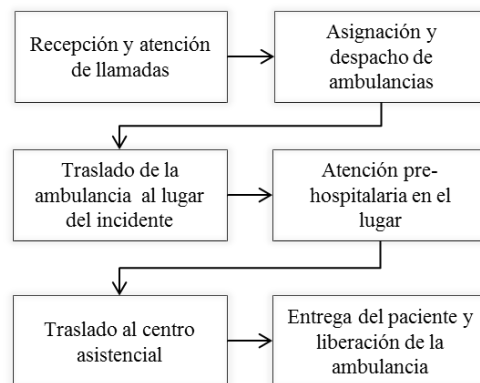
El incremento en la cantidad de accidentes de tránsito reportados al Número Único de Seguridad y Emergencias 123 (NUSE), ha llevado a las autoridades locales de la ciudad de Medellín a buscar alternativas para enfrentar esta problemática del lado de la atención pre-hospitalaria que se le brinda a las víctimas de este tipo de incidentes. Dicha problemática no es exclusiva de la ciudad de Medellín, según la Organización Mundial de la Salud, los traumatismos por accidentes de tránsito serán para el año 2030, la quinta causa principal de mortalidad, sobrepasando enfermedades como el VIH/SIDA (Organización Mundial de la Salud, 2009).

Para el caso particular de la ciudad de Medellín, estudios del año 2010 sobre accidentalidad, muestran el crecimiento significativo del parque automotor de la ciudad respecto al año 2007 en un 34%. Si bien este es un factor influyente en la tasa de accidentalidad, las acciones emprendidas por la administración municipal han reducido en un 9.5% la cantidad de accidentes de tránsito con heridos y en un 8.8% la cantidad de accidentes de tránsito con muertos respecto al año 2009. A pesar de que ha habido una desaceleración en la cantidad de accidentes de tránsito con víctimas, sigue siendo preocupante el crecimiento del número de vehículos en la ciudad, especialmente de motos, que para el año 2010 causaron el 55.5% de los accidentes con víctimas reportados (Alcaldía de Medellín, 2010). El contexto descrito anteriormente, evidencia la importancia de fortalecer los sistemas de atención de emergencias, tanto en su parte operativa como estratégica, en aras de proteger la vida de los ciudadanos y de garantizar una adecuada atención en medio de la escasez de recursos.

Los sistemas de atención de emergencias siguen, en general, un proceso similar al que se muestra en la Figura 1, que inicia con la recepción de las llamadas donde se reportan eventos de diferentes tipos que representan situaciones de emergencia con particularidades que determinan el tipo de atención necesaria, siguiendo con el despacho y desplazamiento de los recursos necesarios para prestar la atención requerida, posteriormente se hace la atención pre-hospitalaria en el lugar de ocurrencia, se desplaza al paciente al centro asistencial más adecuado y

finalmente se entrega al paciente con su historia clínica y se liberan los recursos utilizados, que deben ser reacondicionados para atender una nueva emergencia. Este proceso obedece a la operación del sistema de atención y está influenciado por un nivel de decisión más estratégico que toma decisiones de largo plazo.

En el contexto de este trabajo, las emergencias consideradas son aquellas que necesitan ser atendidas por medio de ambulancias que se asumen homogéneas, es decir, que están equipadas con los mismos recursos y que pueden atender los mismos tipos de emergencia sin importar cuál de ellas sea escogida para prestar el servicio. Adicionalmente, no se enfoca en el proceso operativo descrito anteriormente, sino que se encarga de una parte del proceso de decisión estratégico, que encuentra la cantidad y la localización adecuada de las ambulancias de acuerdo a las características de la demanda y de ciertas reglas de cobertura y ocupación que serán descritas posteriormente.



**Figura 1. Proceso de atención de emergencias**

El proceso de decisión de un sistema de atención de emergencias, tienen dos decisiones críticas que tomar con respecto a las ambulancias, por un lado están las políticas de despacho de los servidores y por otro la localización de éstos para cumplir con los requerimientos propios del caso particular. Ambas decisiones son críticas para el éxito del sistema de emergencias y a pesar de que a primera vista parecen elecciones que ocurren en tiempo dinámico, requieren de una cuidadosa planeación para garantizar la agilidad en la prestación del servicio (Goldberg, 2004).

De manera general, el tiempo de atención de emergencias está compuesto por tres partes principalmente: en primer lugar está el tiempo que transcurre entre la recepción de la llamada que notifica la situación de emergencia y el momento en que el receptor delega la atención a la entidad correspondiente (bomberos, tránsito, etc.), en segundo lugar está el tiempo que la entidad encargada de la atención se demora en llegar al lugar del incidente y por último, está el tiempo de atención de la emergencia en el sitio de ocurrencia. Para efectos de ésta investigación, se analiza el tiempo que la entidad encargada se demora en llegar al lugar de la emergencia, puntualizando en aquellos eventos que deben ser atendidos con ambulancias.

En este artículo se describe el desarrollo de un modelo matemático capaz de determinar la cantidad de ambulancias necesarias para atender las emergencias reportadas al Número Único de Seguridad y Emergencias – 123 de la ciudad de Medellín y su adecuada localización geográfica de manera que se logre maximizar la cobertura poblacional del servicio de acuerdo con la distribución geográfica y temporal de la demanda estimada con la información histórica.

La estructura del artículo es la siguiente: la Sección 2 presenta una breve revisión de la literatura relacionada. Luego la Sección 3 describe el modelo matemático desarrollado. Posteriormente la Sección 4 muestra los detalles del caso de estudio enfatizando en la información utilizada, su respectivo análisis y los resultados obtenidos al aplicar el modelo propuesto. Finalmente, la Sección 5 presenta algunas conclusiones y posibilidades de trabajo futuro.

## 2. Revisión de la literatura

Los modelos de localización de instalaciones han sido utilizados ampliamente en el diseño y optimización de sistemas para la prestación de servicios de salud. En particular, una de las decisiones que ha sido estudiada considerablemente es la localización de ambulancias para la atención de emergencias. En esta sección se presenta una breve revisión de las técnicas y modelos más representativos en esta área. Para una revisión detallada de los modelos de localización y re-localización de ambulancias el lector interesado puede remitirse a Goldberg, (2004) y a Brotcorne et al. (2003). Igualmente, Daskin & Dean (2004) presentan en detalle los modelos de localización de instalaciones para la prestación del servicio de salud (ambulancias, hospitales, unidades especializadas, etc.).

Diversas metodologías son utilizadas para ubicar servidores en sistemas de emergencias, dichas metodologías se pueden agrupar en dos categorías principales: los modelos probabilísticos que utilizan simulación (Goldberg, 2004) o teoría de colas espacial (modelos hipercubo) (Larson, 1975) y los modelos de programación entera (Brotcorne et al., 2003). Puesto que el modelo utilizado en este artículo es un problema de programación entera, la revisión se concentra en los modelos de este tipo.

En general, los modelos de programación entera empleados para la localización de ambulancias tienen una estructura similar en la que se busca maximizar la capacidad de respuesta del sistema. Para medirla se considera un tiempo máximo de respuesta que determina el éxito de la atención, el cual induce a su vez un área de cobertura cuando se decide ubicar una ambulancia en un determinado lugar. Inicialmente, los modelos aplicados a la localización de ambulancias no consideraron la ocupación del sistema (asumiendo implícitamente capacidad ilimitada). De esta manera, un determinado lugar se considera cubierto si se ha decidido localizar al menos una ambulancia que puede responder dentro del tiempo máximo de servicio. Este supuesto da lugar al Problema de Localización por Cobertura de Conjuntos (*Set Covering Location Problem –SCLP*) en el cual se minimiza el número de servidores necesarios para cubrir totalmente la demanda en una determinada región (Toregas et al., 1971). En el SCLP es común que se exijan demasiados servidores adicionales para cubrir un porcentaje reducido de la demanda, además es posible que no se tenga suficiente presupuesto para garantizar la cobertura total. Esto llevó al desarrollo del Problema de Localización de Máxima Cobertura (*Maximal Covering Location Problem –MCLP*) (Church & ReVelle, 1974) en el cual se busca maximizar la demanda cubierta dentro del tiempo máximo de servicio por un número predeterminado de servidores.

Conscientes de las limitaciones que tiene ignorar la ocupación de los servidores, Gendreau et al. (1997) desarrollaron el concepto de doble cobertura en el cual se maximiza el número de zonas de demanda cubiertas por más de una ambulancia. De esta manera se considera implícitamente la ocupación del sistema al maximizar la posibilidad de tener una ambulancia que pueda responder cuando la ambulancia principal (más cercana) se encuentra ocupada. En otra dirección se encuentran los modelos de localización que consideran explícitamente la ocupación de las ambulancias. El primero de estos modelos fue el Problema de Localización de Máxima Cobertura Esperada (*Maximum Expected Coverage Location Problem –MEXCLP*) (Daskin, 1983) en el que se maximiza la demanda cubierta ponderada por la disponibilidad del servicio. La cual se calcula a través de la estimación global del nivel promedio de ocupación para cada ambulancia. A su vez, la ocupación del sistema permite establecer la confiabilidad del servicio en cada nodo de demanda, teniendo en cuenta el número de ambulancias localizadas dentro del tiempo de respuesta deseado. Por su parte, el Problema de Localización de Máxima Disponibilidad (*Maximum Availability Location Problem –MALP*) (ReVelle & Hogan, 1989) además de considerar la confiabilidad del sistema, introduce una nueva medida de cobertura, mediante la estimación de niveles de ocupación local, que dependen del número de ambulancias y la demanda agregada en cada zona de la ciudad.

Numerosas extensiones han sido introducidas a estos modelos, por ejemplo, el Problema de Localización de Máxima Cobertura con Estimación Local de la Confiabilidad (*Local Reliability-based Maximum Expected Coverage Location Problem –LR-MEXCLP*) es una combinación del MEXCLP y el MALP en el que la ocupación es calculada por zona y por

número de servidores, es decir, no se considera homogénea para todo el sistema como en el MEXCLP (Sorensen & Church, 2010). Recientemente, Schmid & Doerner (2010) incluyeron tiempos de respuesta dependientes de la hora del día con el fin de incluir en la decisión de localización de las ambulancias, el posible impacto derivado de las horas pico en las cuales el tránsito es más lento.

La aplicabilidad de los modelos de localización de ambulancias se ha evidenciado desde sus orígenes. Por ejemplo, Eaton et al. (1985) describen la utilización de un modelo basado en el MCLP para la localización de ambulancias en Austin Texas). Asimismo, Adenso-Díaz & Rodríguez (1997) utilizaron el MCLP para modelar la localización de ambulancias en zonas rurales de España. Por su parte, Başar et al. (2010) extendieron el modelo de doble cobertura de Gendreau et al. (1997) para considerar ampliaciones del sistema de atención de emergencias en Estambul (Turquía). Morohosi (2008) comparó los resultados de varios modelos de localización como el SCLP, el MCLP y el MEXCLP para la localización de ambulancias en Tokio (Japón). En el contexto Colombiano, Céspedes et al. (2008) propusieron mejoras al tiempo de respuesta a incidentes del Centro Regulador de Urgencias y Emergencias (CRUE) de la ciudad de Bogotá a través de la localización y relocalización de una flota limitada de ambulancias utilizando el modelo propuesto por Gendreau et al. (1997).

Además de la localización de las ambulancias, otras decisiones importantes que deben tomarse en este contexto son: la programación del personal que las opera (Erdoğan et al., 2009), las políticas de despacho (Lee, 2010) y la relocalización dinámica conforme se presentan eventos que requieren atención (Schmid, 2012).

### 3. Modelo matemático

Para modelar la decisión de localización de ambulancias de atención pre-hospitalaria de la ciudad de Medellín se decidió utilizar una variante del MEXCLP en la cual se utilizan secuencialmente dos modelos de localización. Un primer modelo encuentra el número de ambulancias necesarias para operar el sistema. Posteriormente, un segundo modelo que combina elementos del SCLP y del MEXCLP busca minimizar el número de estaciones en las cuales se ubicarán las ambulancias. La notación necesaria para construir los dos modelos se describe a continuación.

Sean  $J = \{1, \dots, m\}$  el conjunto de lugares donde es posible ubicar las ambulancias (i.e., bases de despacho),  $p$  el número de ambulancias que se busca localizar,  $I = \{1, \dots, n\}$  el conjunto de zonas de demanda para el servicio de ambulancias (i.e. barrios de la ciudad). Cada barrio  $i \in I$  tiene asociada una demanda  $d_i$  (medida en minutos) que representa el tiempo de atención derivado de los accidentes que ocurren en el barrio. La distancia entre las bases de despacho  $i \in I$  y los barrios  $j \in J$  se denota con  $h_{ij}$ . A su vez,  $h_{max}$  representa la distancia máxima de cobertura (la cual se deriva a partir del tiempo de respuesta máximo establecido para el diseño del sistema). Utilizando los valores de  $h_{ij}$  y  $h_{max}$  es posible determinar el conjunto  $N_i$  de bases que están en capacidad de atender al barrio  $i \in I$  dentro del tiempo máximo de respuesta:  $N_i = \{j \in J: h_{ij} \leq h_{max}\}$ .

Con base en la duración del turno  $t$  (medida en minutos) y la demanda total agregada, se estima la utilización global del sistema  $b_s$ , uno de los componentes más importantes del MEXCLP, la cual está dada por la expresión (1):

$$b_s = \frac{\sum_{i \in I} d_i}{p \times t} \quad (1)$$

Una vez obtenida  $b_s$  es posible calcular el índice de calidad  $q_k$  que mide la disponibilidad del servicio en un barrio cuando se tienen  $k$  ambulancias localizadas dentro del radio de cobertura  $N_i$ . Bajo el supuesto de independencia de la ocupación de las ambulancias,  $q_k$  es la probabilidad de que haya al menos una ambulancia disponible para atender la demanda de un barrio. El valor de  $q_k$  se calcula para cada uno de los posibles valores de  $k$  ( $k=1, \dots, p$ ) según se muestra en la expresión (2).

$$q_k = 1 - (b_s)^k \quad (2)$$

El número de ambulancias localizadas en un determinado sitio se representa con la variable de decisión entera  $x_j$  ( $\forall j \in J$ ). Mientras que la variable binaria  $y_{ik}$  ( $\forall i \in I, k = 1, \dots, p$ ) permite calcular la calidad del servicio ofrecido a cada barrio;  $y_{ik} = 1$  si el barrio  $i$  esta cubierto por  $k$  ambulancias,  $y_{ik} = 0$  en caso contrario.

Utilizando la notación descrita previamente, el MEXCLP puede formularse tal como lo describen Sorensen & Church (2010):

$$\max z_1 = \sum_{i \in I} \sum_{k=1}^p d_i q_k y_{ik} \quad (3)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq \sum_{k=1}^p k y_{ik} \quad \forall i \in I \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^p y_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (6)$$

$$x_j \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, k = 1, \dots, p \quad (8)$$

La funcion objetivo  $z_1$  calculada en la expresión (3) representa la cobertura esperada ponderada total de los barrios de la ciudad. Las restricciones (4) y (5) permiten calcular la cobertura de cada barrio. La restricción (4) asegura que la variable  $y_{ik}$  sea igual a 1 cuando el barrio  $i$  tiene  $k$  ambulancias ubicados dentro del radio de cobertura  $N_i$ . Mientras que la restricción (5) obliga que solo un valor de  $q_k$  sea considerado para cada barrio. Por su parte la expresión (6) establece que se ubicarán  $p$  ambulancias. Finalmente, las expresiones (7) y (8) definen el dominio de las variables de decisión.

El MEXCLP descrito en el modelo (3) – (8) se utiliza en un análisis paramétrico en el cual el valor de  $p$  se incrementa iterativamente hasta llegar a un nivel en el cual la cobertura esperada no aumenta mas de un 1% al agregar una ambulancia más al sistema. Este análisis paramétrico permite encontrar un número ideal de ambulancias  $\hat{p}$  y un valor óptimo de cobertura asociado a este número de ambulancias  $z_1^*$ . Utilizando estos valores se construye un segundo modelo (MEXCLP+SCLP) agregando al MEXCLP descrito previamente algunos elementos del SCLP.

El MEXCLP+SCLP busca minimizar el número de bases desde las que se despachan las ambulancias, ya que es más costoso operar un sistema con muchas bases para las ambulancias que un sistema con pocas bases para su despacho. Para construir este nuevo modelo, es necesario definir una nueva variable binaria  $w_j$ . Si se decide ubicar una base para el despacho de ambulancias en el sitio  $j \in J$  la variable  $w_j$  es igual a 1; mientras que  $w_j$  es igual a 0 si no se ubica una base en el sitio  $j \in J$ . Utilizando la notación del MEXCLP y la nueva variable introducida, el MEXCLP+SCLP se formula de la siguiente manera:

$$\min z_2 = \sum_{j \in J} w_j \quad (9)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in I} \sum_{k=1}^p d_i q_k y_{ik} = z_1^* \quad (10)$$

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq \sum_{k=1}^p k y_{ik} \quad \forall i \in I \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^p y_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (12)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = \hat{p} \quad (13)$$

$$x_j \leq \hat{p} \cdot w_j \quad \forall j \in J \quad (14)$$

$$w_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (15)$$

$$x_j \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall j \in J \quad (16)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, k = 1, \dots, p \quad (17)$$

La función objetivo del MEXCLP+SCP (9) busca minimizar el número de bases abiertas garantizando (con la restricción (10)) que la cobertura esperada obtenida con el análisis paramétrico del MEXCLP no se empeora. Por su parte, la restricción (13) garantiza que el número de ambulancias obtenido con el análisis paramétrico también se conserva. La nueva restricción (14) garantiza que sólo se asignan ambulancias a bases abiertas. Mientras que las nuevas variables de decisión se definen en la restricción (15). Los demás elementos del MEXCLP se conservan sin modificación.

Siguiendo este proceso de dos etapas se optimizan lexicográficamente  $z_1$  y  $z_2$ . Es decir, con el MEXCLP se busca primero la mejor cobertura esperada y el número de ambulancias y luego con el MEXCLP +SCLP se busca en los posibles óptimos alternos del MEXCLP aquel que utiliza el menor número de bases de despacho de ambulancias.

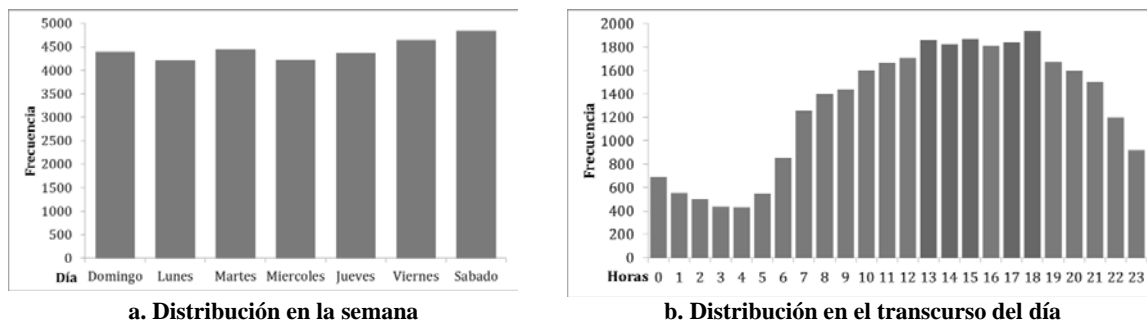
#### 4. Caso de estudio

La aplicación del MEXCLP+SCLP para la mejora del servicio de ambulancias de la ciudad de Medellín se describe a continuación. Inicialmente se presenta el análisis de la información proporcionada por el NUSE y luego se describen los resultados obtenidos al aplicar el modelo propuesto.

##### 4.1 Análisis de la información

Para la realización de este proyecto, el NUSE de la ciudad de Medellín suministró los registros de los eventos que requirieron servicio de ambulancia ocurridos en la ciudad entre junio de 2010 y mayo de 2011. La información proporcionada fue analizada estadísticamente y los diferentes incidentes reportados se georreferenciaron y agregaron por barrios utilizando el sistema de información geográfica (SIG) ArcGIS. Luego de una depuración importante (que incluyó eliminar registros duplicados, no georreferenciables y reportados fuera del área urbana de la ciudad) se obtuvieron 21042 registros. El primer análisis realizado, corresponde a la distribución temporal de los eventos. Analizando la ocurrencia de los accidentes a lo largo de la

semana, se encontró un ajuste de distribución uniforme lo cual indica que en general, no hay un día de la semana en el cual se concentre un mayor número de incidentes. Este comportamiento se ilustra en la Figura 2a. Por el contrario, cuando se analizó la distribución de los eventos a lo largo del día pudo observarse que hay una mayor frecuencia en las horas del mediodía, con algunos picos en la noche. La distribución de los registros podría asociarse a las horas de mayor actividad en la ciudad, se observa una disminución de los eventos en las horas de la madrugada cuando la movilidad es baja, con un incremento progresivo en la frecuencia de los eventos hasta convertirse casi en una distribución uniforme en el horario comprendido entre las 7h y las 19h para decrecer en las horas de la noche hasta estabilizarse en la madrugada y retomar el ciclo. Este comportamiento de los eventos a lo largo del día es evidente en la Figura 2b. Apoyados en este comportamiento, se decidió descomponer el análisis en dos turnos de 12 horas cada uno: el turno diurno (de mayor demanda) esta comprendido entre las 7h y las 19h, mientras que el turno nocturno (de menor demanda) comienza a las 19h y termina a las 7h.



**Figura 2. Distribución temporal de los eventos.**

Un factor importante a considerar dentro del MEXCLP, es el tiempo requerido para la atención de los eventos, en este caso, el análisis se concentra en el tiempo comprendido desde que se despacha la ambulancia hasta la liberación del recurso una vez se cierra el ciclo de atención. Para determinar cual es el comportamiento de estos tiempos se analizaron todos los eventos en los cuales había registro del tiempo de atención, Se encontró que el 50,49% de los tiempos están por debajo de los 50 minutos. Igualmente, más del 80% de los eventos reportados al NUSE son atendidos en un tiempo menor o igual a 90 min. Finalmente, la distribución de los eventos ha alcanzado el 98% de las observaciones en tiempos menores a 200 min, situación que hace poco probable la aparición de tiempos con magnitudes superiores a la mencionada. A partir de esta información se decidió utilizar un tiempo de 90 minutos por evento al momento de calcular la carga de atención generada por cada barrio.

Otro de los componentes importantes del MEXCLP es la distancia máxima de cobertura ( $h_{max}$ ). Para poder estimar el tiempo de desplazamiento entre cada posible lugar de ubicación de las ambulancias y los diferentes barrios de la ciudad se utilizaron las distancias entre los centroides geográficos. Dado que estos desplazamientos se realizarán por la malla vial, se utilizó la versión 3 del API de Google Maps para encontrar la distancia más corta entre cada par de barrios. Como resultado se obtiene una matriz (asimétrica)  $\{h_{ij}\}$  de distancias entre barrios, con la cual es posible estimar el tiempo de desplazamiento utilizando para ello la velocidad promedio reportada en el sistema inteligente de movilidad de la ciudad (SIM Medellín, 2012). En este caso el tiempo de respuesta máximo deseado fue de 10 minutos, el cual se traduce en una distancia máxima de cobertura de 5.66 Km al utilizar una velocidad promedio de 34 Km/h.



## 4.2 Implementación y resultados

Los modelos de optimización descritos en la sección 3 fueron implementados en IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Versión 12.2, en todos los casos la ejecución de los modelos de optimización tomó menos de 5 minutos en un computador con un procesador AMD Phenom (3 Core) a 1.8GHz con 4 GB de memoria RAM operando bajo Windows 7 (64 bits).

Para evaluar el desempeño de cada solución obtenida con los modelos de optimización se utilizaron tres métricas: el número de ambulancias ( $p$ ), la ocupación del sistema ( $b_s$ ) y la disponibilidad promedio ponderada ( $QoS$ ). Esta última métrica se calcula a partir de la función objetivo óptima  $z_1^*$  como  $QoS = \frac{z_1^*}{\sum_{i \in I} d_i}$ .  $QoS$  representa la probabilidad promedio ponderada de que una zona encuentre una ambulancia disponible cuando se haga una llamada solicitando el servicio.

Para el análisis de los diferentes escenarios se utilizaron los datos de los dos turnos por separado. Tal como se anotó previamente, para encontrar el número ideal de ambulancias requeridas en cada turno se comenzó por  $p_{min}$  ( $p_{min} = \min\{p : b_s < 1\}$ ) y se resolvió iterativamente el MEXCLP incrementando el valor de  $p$  gradualmente hasta el momento en el cual no se encontraron mejoras en la métrica  $QoS$  mayores del 1%. Los resultados de este análisis se resumen en la Figura 3. Tal como puede observarse en la figura, para el turno diurno el número ideal de ambulancias es de 14 mientras que para el turno nocturno (de menor demanda) se requieren únicamente 10 ambulancias.

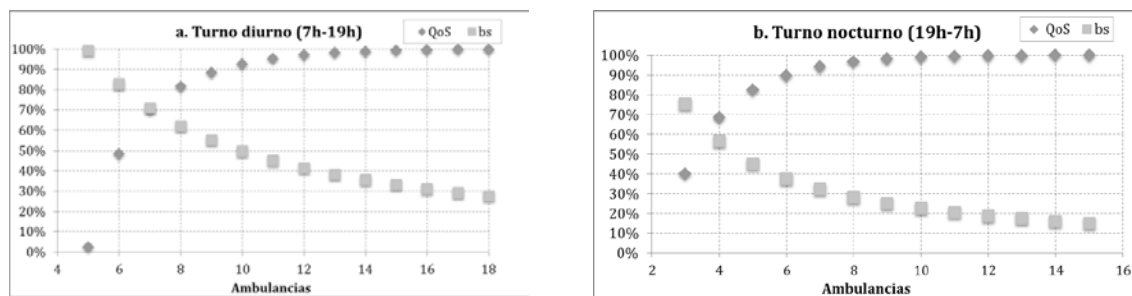


Figura 3. Análisis del número de servidores necesarios por turno

Una vez establecido el número ideal de ambulancias se analizó su ubicación en la ciudad utilizando el modelo MEXCLP+SCLP. Para esta segunda etapa se analizaron tres escenarios por turno: Escenario 1: 6 ambulancias (siguiendo las indicaciones de las personas encargadas del NUSE, ya que actualmente la ciudad solo cuenta con 3 ambulancias para este servicio y tener 6 ambulancias equivaldría a duplicar los recursos disponibles) y ubicación de las ambulancias en cualquiera de los barrios de la ciudad. Escenario 2: número de ambulancias ideal encontrado con el MEXCLP y ubicación de las ambulancias en los lugares donde se encuentran actualmente (estaciones de bomberos). Escenario 3: número de ambulancias ideal encontrado con el MEXCLP y ubicación de las ambulancias en cualquiera de los barrios de la ciudad.

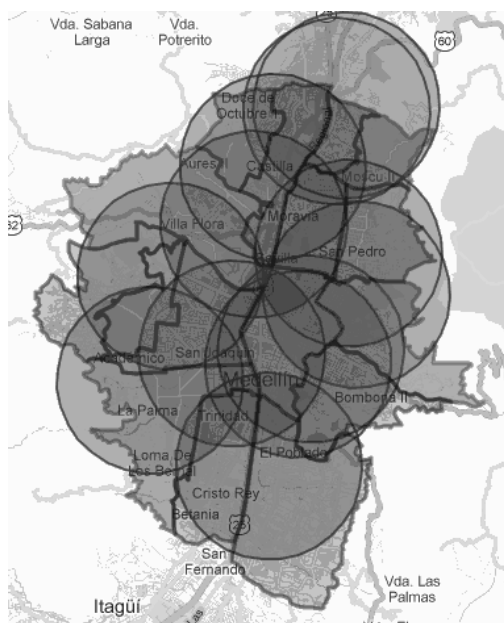
La Tabla 1 resume los resultados obtenidos para cada escenario. Como puede observarse en la tabla, con el número de ambulancias hallado con el MEXCLP (escenarios 2 y 3) se logra una mejor de calidad del servicio ( $QoS > 97\%$ ) bien sea que se localicen en las estaciones de bomberos o en otros sitios de la ciudad. Al comparar los escenarios 2 y 3 de cada turno es claro que la calidad del servicio se ve mas influenciada por la cantidad de servidores que por su localización en lugares diferentes a las estaciones de bomberos. Liberar la localización a otras zonas de la ciudad solo aumenta la calidad del servicio en un 1%.

**Tabla 1. Escenarios de operación del sistema de atención pre-hospitalaria con diferente número de ambulancias por turno.**

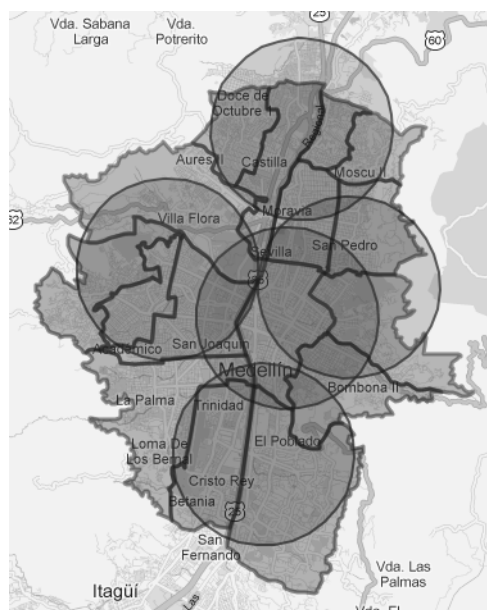
Turno	Escenario	$p$	$b_s$ (%)	QoS (%)	Barrios no cubiertos
Diurno (7h-19h)	1	6	83	48	64/271
	2	14	35	97	10/271
	3	14	35	98	3/271
Nocturno (19h-7h)	1	6	38	86	23/271
	2	10	23	97	17/271
	3	10	23	98	14/271

Si se compara el escenario 1 (6 ambulancias) para el turno de mayor demanda (7h-19h) contra los escenarios 2 y 3 que tiene el número ideal de servidores es claro que la calidad del servicio no es buena (<50%) en comparación con el 98% que podría conseguirse con 14 ambulancias. Esto se debe a que la probabilidad de encontrar servidores libres cuando se tienen solo 6 ambulancias es muy baja ya que la ocupación del sistema es del orden del 83%. Igualmente, el número de barrios no cubiertos en este turno es 64 lo que representa casi el 25% de los barrios de la ciudad. Por el contrario, aunque 6 servidores en el turno nocturno (19h-7h) no es el número óptimo, el deterioro de la calidad del servicio es mucho menor pasando de 98% a 83% cuando se comparan el escenario 1 con los escenarios 2 y 3.

A manera de ejemplo, la Figura 4 presenta el despliegue de las ambulancias en el escenario 3 para cada turno. Cuando se compara el despliegue de las ambulancias entre ambos turnos puede observarse como la localización se adapta a los patrones de demanda, según los cuales los accidentes se concentran en diferentes zonas de la ciudad dependiendo de la hora del día (en el turno diurno muchas ambulancias deben cubrir el centro de la ciudad donde se concentra un número importante de accidentes, mientras que en la noche la periferia donde habita la mayoría de la población requiere una atención más importante). El efecto de la segunda fase en la cual se reducen las bases de despacho de ambulancias es más evidente en el turno nocturno, donde el modelo sugiere únicamente 5 bases para localizar las 10 ambulancias requeridas.



a. Turno 7h-19h



b. Turno 19h-7h

**Figura 4. Despliegue de las ambulancias en el escenario 3 para cada turno.**

## 5. Conclusiones

En este artículo se presentó el modelo de localización de instalaciones desarrollado para apoyar las autoridades de Medellín en la mejora del sistema de atención pre-hospitalaria de la ciudad. Sistema que está dedicado principalmente a atender los heridos ocasionados por los accidentes de tránsito, fenómeno que viene creciendo y ha generado preocupación en la administración municipal y en la población en general. El modelo desarrollado combina los elementos del problema de localización de máxima cobertura esperada (MEXCLP) y el problema de localización por cobertura de conjuntos (SCLP). Aplicando el modelo propuesto a los datos históricos del último año (comprendido entre junio de 2010 y junio de 2011) se encontró que la propuesta de mover las ambulancias de sus bases actuales ubicadas en las estaciones de bomberos (una alternativa que la ciudad está explorando) aporta poco en la mejora de la calidad del servicio. Por el contrario, fue posible identificar el número ideal de ambulancias que debería operar el sistema, el cual es mucho mayor que el número actual.

Entre las alternativas de trabajo futuro que se están explorando actualmente se encuentra la modelación utilizando teoría de colas espacial con el modelo hipercubo (Larson, 1975) y su combinación con el modelo de optimización propuesto (Batta et al., 1989).

## Agradecimientos

Este trabajo fue co-financiado por la Empresa de Seguridad Urbana (ESU) de la ciudad de Medellín. Los autores agradecen este apoyo así como el acceso a la información utilizada en el caso de estudio. Igualmente, los autores agradecen el apoyo recibido de la Universidad de Antioquia a través de los proyectos de Investigación MC10-1-01 (Identificación de un modelo de decisión para la operación logística del sistema de Teleasistencia Prehospitalaria del Valle de Aburrá) y de Extensión BUPPE-223104 (Estructuración de un Modelo de Operación Logístico para el Sistema de Teleasistencia Prehospitalaria del Área Metropolitana del Valle de Aburrá).

## Referencias

- Adenso-Díaz, B., & Rodríguez, F.** (1997). A simple search heuristic for the MCLP: Application to the location of ambulance bases in a rural region. *Omega*, 25(2), 181-187.
- Alcaldía de Medellín.** (2010). Informe anual de accidentalidad (p. 88). Medellín. [http://www.medellin.gov.co/transito/archivos/documentos-interes/informe\\_accidentalidad.pdf](http://www.medellin.gov.co/transito/archivos/documentos-interes/informe_accidentalidad.pdf)
- Batta, R., Dolan, J., & Krishnamurthy, N. N.** (1989). The maximal expected covering location problem: Revisited. *Transportation Science*, 23(4), 277-287.
- Başar, A., Çatay, B., & Ünlüyurt, T.** (2010). A multi-period double coverage approach for locating the emergency medical service stations in Istanbul. *Journal of the Operational Research Society*, 62(4), 627-637.
- Brotcorne, L., Laporte, G., & Semet, F.** (2003). Ambulance location and relocation models. *European Journal of Operational Research*, 147(3), 451-463.
- Church, R., & ReVelle, C.** (1974). The maximal covering location problem. *Papers in Regional Science*, 6(6), 101-118.
- Céspedes, S. M., Amaya, C. A., & Velasco, N.** (2008). Localización y relocalización de ambulancias del centro regulador de urgencias y emergencias de Bogotá. *Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad de los Andes*. <http://dspace.uniandes.edu.co:9090/xmlui/handle/1992/1121>
- Daskin, M.S., & Dean, L. K.** (2004). Location of health care facilities. In M. Brandeau & W. Pierskalla (Eds.), *Handbook of OR/MS in Health Care: A Handbook of Methods and Applications*, (Vol. 7, pp. 43-76). Kluwer Academic Publishers.
- Daskin, M.S.** (1983). A maximum expected covering location model: formulation, properties and heuristic solution. *Transportation Science*, 17, 48-70.

- Eaton, D., Daskin, M., Simmons, D., & Bulloch, B.** (1985). Determining emergency medical service vehicle deployment in Austin, Texas. *Interfaces*, 15(1), 96-108.
- Erdoğan, G., Erkut, E., Ingolfsson, A., & Laporte, G.** (2009). Scheduling ambulance crews for maximum coverage. *Journal of the Operational Research Society*, 61(4), 543-550.
- Gendreau, M., Laporte, G., & Semet, F.** (1997). Solving an ambulance location model by tabu search. *Location Science*, 5(2), 75-88.
- Goldberg, J. B.** (2004). Operations Research Models for the Deployment of Emergency Services Vehicles, *EMS Management Journal* 1(1), 20-39.
- Larson, R.** (1975). Approximating the performance of urban emergency service systems. *Operations Research*, 23(5), 845-868
- Lee, S.** (2010). The role of preparedness in ambulance dispatching. *Journal of the Operational Research Society*, 62(10), 1888-1897.
- Morohosi, H.** (2008). A case study of optimal ambulance location problems. *The 7th International Symposium on Operations Research and Its Applications (ISORA'08)* (pp. 125-130).
- Organización Mundial de la Salud.** (2009). Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial. Es hora de pasar a la acción (p. 122). [http://www.cepal.org/usi/noticias/noticias/6/28826/Glabal\\_Status\\_report\\_2009\\_ES.pdf](http://www.cepal.org/usi/noticias/noticias/6/28826/Glabal_Status_report_2009_ES.pdf)
- ReVelle, C., & Hogan, K.** (1989). The Maximum Availability Location Problem. *Transportation Science*, 23(3), 192-200.
- SIM Medellín.** (2012). Indicadores de Movilidad. Secretaría de Transito y Transporte de Medellín. <http://www.medellin.gov.co/transito/linea-base.html>
- Schmid, V.** (2012). Solving the dynamic ambulance relocation and dispatching problem using approximate dynamic programming. *European Journal of Operational Research*, 219(3), 611-621.
- Schmid, V., & Doerner, K. F.** (2010). Ambulance location and relocation problems with time-dependent travel times. *European journal of operational research*, 207(3), 1293-1303.
- Sorensen, P., & Church, R.** (2010). Integrating expected coverage and local reliability for emergency medical services location problems. *Socio-Economic Planning Sciences*, 44(1), 8-18.
- Toregas, C., Swain, R., & ReVelle, C.** (1971). The location of emergency service facilities. *Operations Research*, 19(6), 1363-1373.