



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA DE SISTEMAS – INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

***“Localización Óptima de Ambulancias en Ciudad Universitaria,  
empleando Simulación”***

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
Ing. José Alexander Vindel Garduño

TUTOR PRINCIPAL  
Dra. Idalia Flores de la Mota  
División de Ingeniería Mecánica E Industrial

MÉXICO, D. F. Julio 2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Dr. Juan Manuel Estrada Medina  
**Secretario:** M.I. Ann Godelieve Wellens Purnal  
**Vocal:** Dra. Idalia Flores de la Mota  
**1<sup>er</sup> Suplente:** Dra. Esther Segura Pérez  
**2<sup>do</sup> Suplente:** Dr. Miguel Antonio Mujica Mota

**Lugar donde se realizó la tesis:** México, Distrito Federal

**TUTOR DE TESIS:**

**Dra. Idalia Flores de la Mota**

-----

**FIRMA**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la máxima casa de estudios del país, la Universidad Nacional Autónoma de México que a través del Programa de Posgrado en Ingeniería de Sistemas, por haberme permitido ser parte de sus filas de estudiantes de maestría.

Al Conacyt por el apoyo económico brindado.

A mis padres Miriam Garduño y Douglas Vindel por el apoyo incondicional y paciencia que han tenido conmigo.

A la Dra. Idalia Flores de la Mota por su tutoría, atenciones y críticas objetivas que guiaron el camino de este trabajo y mi aventura por los pasillos del posgrado.

A mis profesores que compartieron un poco de su conocimiento.

A mi hermano Luis Alberto Ruiz Salinas por la compañía durante las noches de vela en la realización de este trabajo.

A mis amigos y compañeros del posgrado por todos esos momentos agradables a lo largo de dos años.

Un agradecimiento especial al TUM Fernando Roldan Espinoza y a la Dra. Esther Pérez Segura por facilitarme el acceso a los datos que sostienen este trabajo.

Finalmente gracias a todas esas personas que me han acompañado a lo largo de esta aventura.

## **DEDICATORIA**

A mis padres Miriam y Douglas, que han sido una fuente de inspiración y dedicación.

A mi hermana Lis y su familia que a pesar de la distancia han hecho sentir su apoyo.

A mis hermanos Luis y Mariana que han permanecido a mi lado estos largos años.

## Índice

Introducción.....	7
Objetivo.....	9
Objetivos Específicos.....	9
Justificación.....	9
1. Marco teórico.....	10
1.1. Atención pre hospitalaria.....	10
1.1.1. Dirección de Servicios Médicos (DGSM) en Ciudad Universitaria (CU) .....	12
1.1.2. Atención hospitalaria en CU .....	12
1.2. Localización de recursos.....	14
1.2.1. Tipos de modelos.....	16
1.2.1.1. P-Mediana.....	16
1.2.1.2. P-Centro.....	17
1.2.1.3. Cobertura.....	17
1.2.1.3.1. Cobertura fija (Set Covering Model SCM).....	18
1.2.1.3.2. Cobertura máxima (Máximo Covering Location Model MCLM).....	20
1.2.2. Métodos de solución existentes.....	22
1.2.2.1. Programación entera.....	22
1.2.2.2. Lindo.....	23
1.3. Simulación.....	26
1.3.1. Ventajas y desventajas.....	27
1.3.2. Simio.....	28
2. Metodología.....	29
2.1. Toma de datos.....	29
2.1.1. Selección de la información.....	30
2.1.2. Pruebas de bondad de ajuste.....	31
2.1.3. Ajuste de los datos de Ciudad Universitaria (CU).....	32
2.2. Modelo de localización.....	33
2.2.1. Selección del modelo.....	33
2.2.2. Planteamiento del MCLM.....	34
2.3. Modelo de simulación.....	37

2.3.1. Escenarios.....	41
3. Resultados.....	42
3.1. Datos.....	42
3.1.1. Ajuste de los datos de Ciudad Universitaria (CU).....	43
3.2. Modelo de localización.....	47
3.2.1. Resultado del modelo MCLM.....	48
<b>3.3. Modelo de simulación.....</b>	<b>49</b>
3.3.1. Escenario b.....	52
3.3.2. Escenario c.....	54
3.3.3. Escenario d.....	57
3.3.4. Escenario e.....	59
4. Conclusiones.....	62
5. Bibliografía.....	65
6. Anexo.....	68

## Introducción

Registros históricos del manejo de pacientes lesionados o enfermos se remonta a tiempos bíblicos. Durante los siglos XVIII y XIX se usaron diferentes métodos con el propósito de atención al lesionado; pero no fue hasta que Jean Dominique Larrey comenzó con el primer sistema de atención pre hospitalario.

Los sistemas médicos de emergencias son estructuras complejas en las que interactúan diversos elementos que van desde los mecanismos para activarlos hasta, idealmente, la rehabilitación integral del paciente. Hasta hace poco tiempo no se había considerado realizar análisis para utilizar modelos de localización y simulación para ponerlos a disposición de la atención de ambulancias (recursos, instalaciones), en este caso se consideró al servicio de urgencias de Ciudad Universitaria (CU). que se encuentra disponible en diversas zonas dentro de la Universidad Nacional Autónoma de México, sin embargo, los resultados obtenidos al aplicar dichos modelos se pueden considerar y aplicar en diversos trabajos de investigación al respecto, proporcionando una estructura institucional sólida que requiere de medidas de atención de eficiencia ofreciendo grandes posibilidades de mejorar el servicio.

El presente trabajo analiza, desde una perspectiva de simulación los servicios que se brindan en Servicios de Urgencias en CU. Aspectos que utilizando estos modelos ofrecen un gran impacto para el futuro de la actividad cuyo objetivo es proponer una mejora de la atención de los pacientes que requieren tratamiento médico de urgencia y mejorar la capacidad de respuesta ante incidentes considerando la mejor atención en el menor tiempo posible.

La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ofrece este servicio desde 1982, usando vehículos con la capacidad suficiente para proveer soporte de vida básico y avanzado a través de un equipo multidisciplinario constituido tanto por profesionales como técnicos en el área de atención pre hospitalaria. A pesar de que algunos estudios se han llevado a cabo para mejorar la eficiencia



en el tiempo de transporte de los pacientes que requieren atención pre hospitalaria (APH), aún hay poca evidencia de algún estudio cuidadoso conducido en México. La eficiencia del sistema de APH es medido por el promedio del tiempo de respuesta, que es el tiempo que tardan en llegar los técnicos en urgencias médicas (TUM's) a la escena del accidente, atender al paciente y trasladarlo (la) al hospital de ser necesario.

Con el propósito de satisfacer la norma oficial mexicana de calidad y mejorar sus servicios, se propone realizar un diagnóstico del desempeño del sistema. Para dicho diagnóstico se aplicaron técnicas cuantitativas de planeación para medir la calidad de la infraestructura disponible, servicio de atención pre hospitalaria y la capacidad de respuesta, junto con otros criterios.

Los resultados al aplicar el modelo de máxima cobertura y el modelo de simulación, proponen obtener resultados positivos, motivo por el cual el uso de esta herramienta tiene un gran impacto en la sociedad que demanda de servicios eficientes ante un constante crecimiento de la población y la atención que requiere.

Un ingeniero es alguien que resuelve problemas de interés a la sociedad mediante la eficiente aplicación de principios científicos. Los ingenieros logran esto, ya sea mediante refinar procesos o productos existentes o diseñando un nuevo producto o proceso que satisfaga las necesidades de clientes (Montgomery, 2003). Por esto en esta tesis se propone utilizar técnicas de investigación de operaciones para refinar el proceso de localización de las ambulancias dentro de ciudad universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México y con ello optimizar el tiempo de transporte.

## **Objetivo**

Seleccionar un modelo adecuado para la localización de bases de salida de un servicio pequeño de ambulancias del sistema pre-hospitalario de Ciudad Universitaria (UNAM), así como emplear la simulación para comparar diferentes escenarios de localización, y seleccionar el que logre el menor tiempo de transporte.

## **Objetivos específicos**

- Analizar la bibliografía existente sobre la localización de recursos y simulación de eventos discretos
- Revisar los antecedentes y las características de la atención pre-hospitalaria
- Analizar los datos de la demanda del servicio pre-hospitalaria dentro de Ciudad Universitaria (UNAM)
- Ajustar las demandas del servicio a una función de probabilidad para posteriormente emplearlo dentro de la simulación
- Definir el modelo conceptual de localización para la simulación
- Definir escenarios para la simulación
- Efectuar diferentes corridas del modelo de simulación para elegir el escenario de localización con menor tiempo de transporte.

## **Justificación**

Entendiendo la atención pre hospitalaria como un sistema que puede ser mejorado en cuanto a su tiempo de transporte, mismo que es vital para la salvaguarda de una persona que requiere el servicio, se propone utilizar un modelo de simulación para evaluar escenarios que de otra forma seria complicado y costoso.

## 1. Marco teórico

### 1.1. Atención pre hospitalaria

La atención pre hospitalaria se define como un servicio operacional y de coordinación para los problemas médicos urgentes (Ayuso, 2011). Esta ha existido desde hace miles de años; comenzó cuando el hombre decidió salir a cazar y hacer la guerra, inmediatamente fue reconocida la necesidad de una asistencia precoz; a lo largo de la línea del tiempo (figura 1), se puede observar parte de la evolución que la atención pre hospitalaria ha tenido.

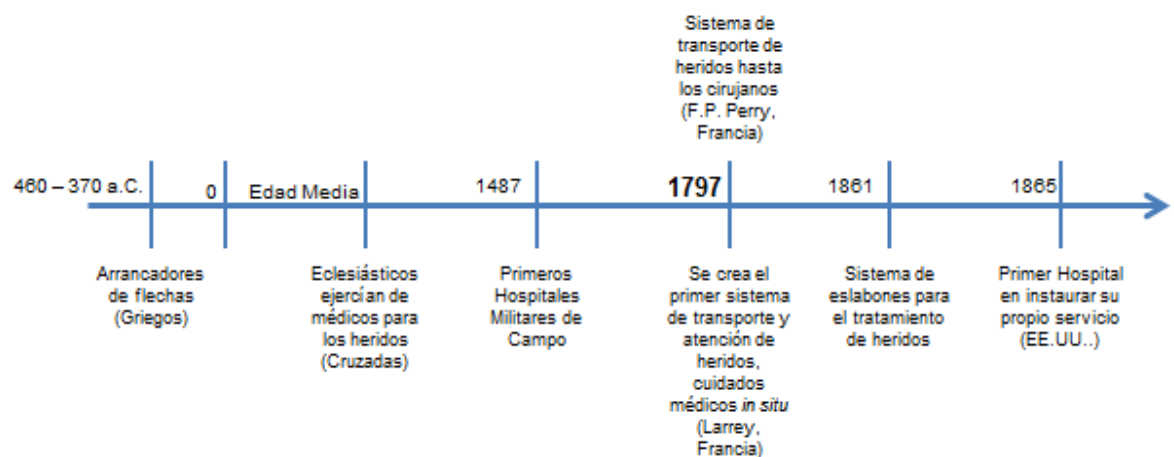


Figura 1. Evolución temporal de la atención pre hospitalaria

Como se puede observar fue en la época de los griegos donde se marca un inicio, esto debido a que ellos fueron los primeros en designar gente especializada en atender a sus heridos en combate a estos se les llamaba simplemente arrancadores de flechas, y así continuo el tratamiento de heridos por muchos años con técnicas rudimentarias que incluso podían hacer más daño del que se quería evitar; la historia siguió su curso hasta llegar a la edad media, no sin antes haber pasado por los árabes quienes aportaron con muchas nuevas metodologías para el tratamiento de pacientes, metodologías que fueron traducidas al latín por los eclesiásticos del momento, estos últimos

fueron los que hacían de lo que podríamos ahora conocer paramédicos para los cruzados en tiempos de guerra, aplicando los conocimientos adquiridos gracias a los mismos árabes; no fue sino hasta 1797 en Francia que un cirujano de Napoleón de nombre Dominique – Jean Larrey quien sugirió una nueva forma de tratar a los heridos en los campos de batalla de manera tal que el índice de mortalidad se redujo. Este novedoso sistema consistía en una carreta donde viajaba un cirujano con el equipo necesario para atender y estabilizar a ciertos heridos, el vehículo recogía a los heridos del campo de batalla, lo que se conoce como atención *in situ* para ser llevados a un hospital mayor si era el caso, y así fue como nació el primer transporte pre hospitalario, pero no fue sino hasta 1865 que un hospital ofreció este servicio muy similar al que conocemos ahora.

En México como en muchos otros países de Latinoamérica se sigue el modelo anglosajón donde el paciente es trasladado hasta el centro hospitalario, la característica fundamental de este modelo es que la asistencia a nivel pre hospitalario es realizada por técnicos en urgencias médicas (TUM), a diferencia del modelo Franco – Alemán (Fraga, 2010). Una correcta atención de emergencia reduce en un 11% el número de muertos y en un 12% el de discapacitados(Silva, 2006), esto si esta atención es rápida, especializada y eficaz en lo que se denomina la hora dorada, en esta hora los tratamientos y técnicas están encaminadas a maniobras de resucitación y mantenimiento del paciente especialmente en vías aéreas y lesiones vitales potencialmente tratables, cuando se trata de pacientes que presentan cuadros clínicos “tiempo-dependientes”(Cruz, 2004), donde el tiempo de respuesta juega un papel importante, para pacientes que hayan sufrido algún trauma o paro cardiaco el tiempo es un factor de suma importancia, donde cada minuto de retraso en la atención reduce la probabilidad de sobrevivencia en un 10% a 12 % (Ates, 2011), motivo por el cual es necesaria la búsqueda de estrategias dirigidas a fomentar el desarrollo de sistemas de salud, donde se resalta la necesidad de una mejora en la atención pre hospitalaria en el sistema de transporte, tarea que es permanente dentro de cualquier sistema pre hospitalario.

### 1.1.1. Dirección de Servicios Médicos (DGSM) en Ciudad Universitaria (CU)

El objetivo de los Servicios Médicos en la UNAM es: promover, proteger y restablecer la salud del estudiante universitario para contribuir a su desarrollo integral, así como, colaborar en el logro de la salud de la comunidad universitaria y de la población en general fomentando el auto cuidado.

En este contexto, la atención médica representa no sólo la posibilidad de recuperar la salud, es además el medio por el que el joven adquiere una cultura preventiva. Este es un proceso fundamentalmente educativo, en el que se busca sustituir conductas de riesgo por hábitos que favorezcan una mejor calidad de vida, además de que entre los servicios con los que cuenta son los servicios de urgencias.

### 1.1.2. Atención hospitalaria en CU

El servicio de urgencias del Centro Médico Universitario cuenta con recursos para atender los casos leves y moderados, sólo los casos graves y los que requieren hospitalización se derivan a instituciones del sector salud.

Uno de los logros de la Dirección, ha sido la introducción de programas de atención pre hospitalaria como una actividad fundamental del área. La atención pre hospitalaria tiene como objeto proporcionar atención inmediata de primeros auxilios y de urgencias *in situ* en el transcurso de los primeros 60 minutos, "hora dorada "(Monge, 2000), para responder a las necesidades del caso, estabilizar, inmovilizar y trasladar al paciente al servicio de especialidad que requiera. La atención oportuna ofrece una mejor opción de vida al individuo y disminuye la incidencia de invalidez o sus secuelas.

Las emergencias médicas funcionan las 24 horas del día dentro del Centro Médico Universitario, con el apoyo de la Central de Atención de Emergencias. Se cuenta con: cuatro ambulancias, dos de las cuales, están equipadas para soporte avanzado de vida y dos con equipo de soporte básico. Actualmente las

ambulancias tienen un tiempo de respuesta de 5 a 6 minutos en promedio en el perímetro de Ciudad Universitaria, su funcionamiento operativo es a base de guardias, a través de vía telefónica o por radio, sin embargo, considerando el aumento de la población estudiantil, docente, administrativo y de servicios como se muestra en las figuras 2, 3, 4, de los últimos años, este servicio resulta insuficiente, por lo que se hace necesario realizar un análisis para cubrir ésta necesidad y que resulte ser eficiente.

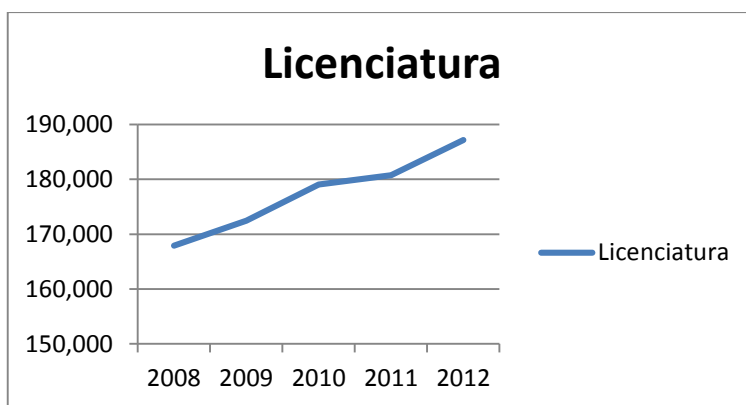


Figura 2. Crecimiento poblacional de alumnos de licenciatura

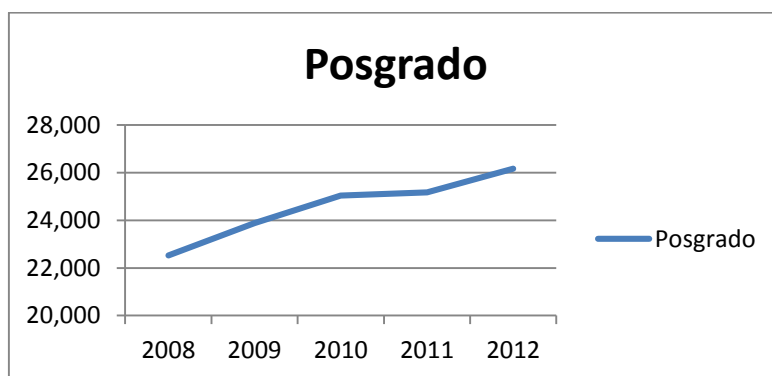


Figura 3. Crecimiento poblacional de alumnos de posgrado

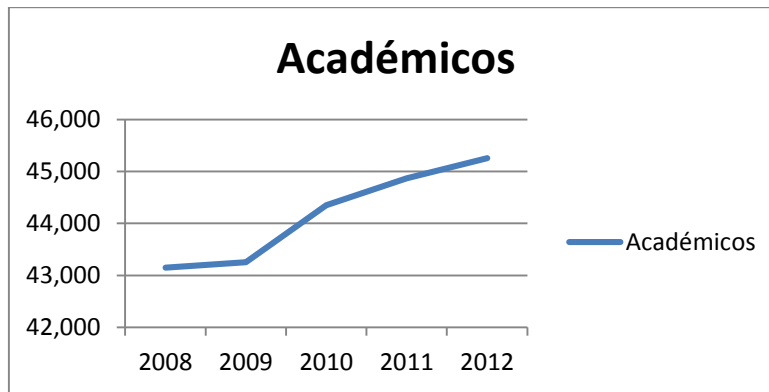


Figura 4. Crecimiento poblacional de personal académico

Como se observa en la figuras 2, 3 y 4 hay una tendencia al crecimiento de la población de Ciudad Universitaria

### 1.2. Localización de recursos

La localización de los recursos e instalaciones dentro de una red logística es una decisión estratégica que determina de forma sustancial la relación costo-servicio del sistema logístico global. En esta decisión se determinan el número (¿Cuántos?), la localización (¿Dónde?) Y el tamaño (ligado al número) de los recursos; un problema más genérico y complejo consistiría en determinar también el preciso momento de realizar la localización (¿Cuándo?) (Robuste, 2005). Las decisiones de localización surgen en una gran variedad en los diferentes sectores, privados o públicos. Por ejemplo un gobierno necesita determinar locaciones para bases de emergencia de vehículos en las carreteras, de la misma manera, instancias locales deben localizar estaciones de bomberos y ambulancias, en cualquiera de los casos, una deficiente localización puede aumentar la probabilidad de daños a la propiedad y/o pérdidas humanas (Daskin, 1995).

La elección de la localización se encuentra directamente asociada con la eficiencia del servicio, en su mayoría dicha eficiencia no se encuentra en la complejidad en el sistema que se pueda construir, sino en el grado de sencillez que este pueda ser operado, dado que la elección no solo significa el análisis

de los datos duros directamente relacionados, sino en la contemplación de todos los factores del entorno que puedan interferir en la realización del servicio, la elección debe entenderse como una cadena de situaciones tanto internas como externas las cuales pueden afectar el grado de veracidad del modelo, debemos partir desde la idea que ninguna decisión debe entenderse como inapelable dado que la utilización de distintos modelos puede afectar en gran medida el resultado que estos pueden brindar, así como también un cambio en el entorno puede afectarlos.

Tenemos que considerar también que una expansión del modelo en cuanto al territorio que abarca podría variar dramáticamente los resultados, en la teoría se anuncia que deben ser evaluados los riesgos, el costo y el beneficio para obtener siempre el mayor beneficio al menor costo, dado que podemos partir del hecho que la optimización de los resultados siempre buscara que al menor costo se obtengan el máximo de beneficios.

La determinación del punto geográfico donde deben ser localizadas debe develar que siempre existe un acceso pronto al mayor número de personas lo que se debe traducir en un impacto considerable al momento de atender un eventualidad, en sentido contrario una mala localización debe significar un obstáculo al momento de ofrecer el servicio, por lo que debe implementarse una política de localización que debe consistir en la valoración del entorno, debe ser capaz de concretar acciones que sean capaces de incorporar las distintas proyecciones y eventualidades que incluso no hayan sido valoradas en este estudio, para asegurar que dicho impacto sea más benéfico.

Las relaciones entre dichos factores no pueden ser consideradas como lineales dado que deben valorarse desde el contexto. Así mismo el modelo debe ser capaz de incorporar nuevas estrategias para justificar su propia validez por ellos debemos describir los distintos modelos que pudieron ser empleados para el desarrollo de este trabajo. Para ello comencare por mencionar acerca de los primeros intentos de la formulación para problemas de localización, hasta llegar a mencionar algunos de estos.



Los primeros intentos datan de principios del siglo XX con Alfred Webber, economista y sociólogo alemán (1868 – 1958) donde intento encontrar el punto de producción más eficiente para una planta industrial dadas las locaciones y distancias de la materia prima y mercados, pero no fue sino hasta la década de los 60's que los investigadores encontraron una solución matemática al problema de Webber. A partir de ese momento, las investigaciones en localización incrementaron rápidamente, impulsadas por el avance en tecnologías de cómputo y la concientización de la aplicación de estos modelos al mundo real (Zanjirani, 1995).

### 1.2.1. Tipos de modelos

Cada uno de los modelos de localización incorpora una variedad de reglas y de funciones objetivo (Daskin, 1995), de modelo a modelo se difiere en los supuestos del entorno en que opera el sistema.

Algunos intentos para modelar este sistema han pasado por modelos de cobertura, P-mediana, P-centro hasta llegar a modelos que emplean sistemas geográficos de información (Ates, 2011).

#### 1.2.1.1. P-Mediana

El problema de la P-Mediana busca la localización de un número dado de instalaciones con el fin de minimizar costos de transporte como: distancia y tiempo. Por lo tanto, una demanda es asignada a la instalación más próxima (Marianov, 2009). Este problema es ampliamente usado tanto en el sector privado como público para la decisión de localización; sus usos incluyen el uso práctico en localizar un número de centros de cambio en una red de telefonía (Hakimi, 1964) almacenes, escuelas, bibliotecas, entre otros.

#### 1.2.1.2. P-Centro

El problema del P-Centro se enfoca en minimizar la máxima distancia que tiene la demanda con respecto de la instalación más próxima que la satisface dado que se tiene un número predeterminado de instalaciones (Daskin, 1995). En este modelo cada punto de demanda tiene un peso asociado. Estos pesos pueden tener diferentes interpretaciones como tiempo por unidad de distancia, costo por unidad de distancia o pérdida por unidad de distancia en otras palabras es hacer lo mejor de lo peor (Zanjarani, 2009).

#### 1.2.1.3. Cobertura

La cobertura es un concepto central para diversos tipos de modelos de localización; indica si la ubicación de la demanda está dentro de un radio predeterminado (medido por distancia, tiempo de transporte, costo u otra métrica) de su instalación designada (lugar donde se satisface la demanda) (Snyder, 2011). En los problemas de cobertura el objetivo es determinar la localización del número mínimo de instalaciones necesarias para cubrir todos los nodos de demanda (Biazaran, 2009). Estos modelos fueron originalmente desarrollados para el sector público, como es la localización de estaciones de bomberos, de policías y centros de emergencias médicas. Sin embargo, han sido ampliamente usados por el sector privado de igual manera

### 1.2.1.3.1. Cobertura fija (Set Covering Model SCM)

El objetivo de este modelo es encontrar un conjunto, de instalaciones, de costo mínimo dentro de un conjunto finito de instalaciones candidatas a manera que cada nodo de demanda este cubierto por al menos una instalación. Y expresado matemáticamente de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } \sum_j f_j X_j \\ & \text{st. } \sum_j a_{ij} X_j \geq 1 \quad \forall i \\ & \quad X_j = 0,1 \quad \forall i \end{aligned}$$

Dónde:

La función objetivo está orientada a minimizar la cantidad de instalaciones a localizar (recursos) mediante los siguientes elementos:  $X_j$  (variable de decisión) es igual a 1 si el recurso se localiza en el nodo  $j$  y 0 de lo contrario,  $f_j$  (variable de entrada) es el costo de ubicar al recurso en el nodo  $j$ ; la restricción a la que está sujeto el modelo asegura que los nodos estarán cubiertos por al menos un recurso,  $a_{ij}$  (variable de entrada) es igual a 1 si el nodo candidato  $j$  puede satisfacer la demanda del nodo  $i$  y cero de otra manera. Por ejemplo el caso de querer satisfacer la necesidad de cobertura de zonas residenciales por centros de bomberos donde los residentes estén cubiertos dentro de un radio de cuatro minutos de la estación más próxima (Snyder, 2011), siendo que se busca cubrir a todos los residentes con el menor número de centros de bomberos; se consideran 6 zonas residenciales con las respectivas distancias entre zonas como se muestra en la figura 5.

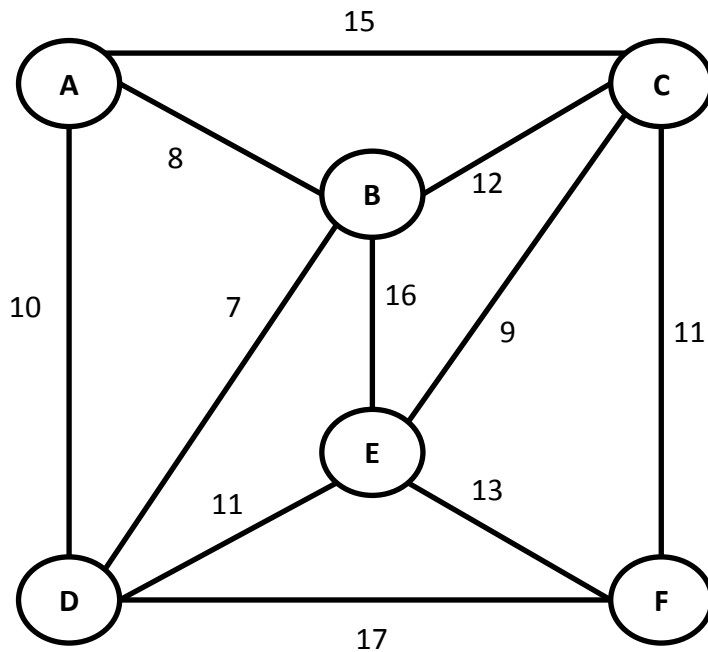


Figura 5. Red para el modelo de cobertura fija

Para simplificar el cálculo y ejemplificar el planteamiento del modelo se considera que  $f_j = 1$  y el radio de cobertura buscado es a lo más de 11 unidades de distancia, se tiene que:

$$F.O \text{ minimizar } X_A + X_B + X_C + X_D + X_E + X_F$$

s. t

$$X_A + X_B + X_D \geq 1 ; \text{cobertura del nodo A}$$

Es de notarse que el nodo C se excluye de la cobertura del nodo A por no cumplir la distancia de cobertura deseada bajo ese criterio se plantean las siguientes restricciones:

$$X_A + X_B + X_D \geq 1 ; \text{cobertura del nodo B}$$

$$X_C + X_E + X_F \geq 1 ; \text{cobertura del nodo C}$$

$$X_A + X_B + X_D + X_E \geq 1 ; \text{cobertura del nodo D}$$

$$X_C + X_D + X_E \geq 1 ; \text{cobertura del nodo E}$$

$$X_A + X_B \geq 1 ; \text{cobertura del nodo F}$$

Donde:  $X_A, X_B, X_C, X_D, X_E, X_F = 0, 1$

La solución a este ejemplo, bajo las restricciones mencionadas, se encuentra en localizar dos estaciones de bomberos en los nodos  $X_C$  y  $X_D$ .

#### 1.2.1.3.2. Cobertura máxima (Maximum Covering Location Model MCLM)

El modelo MCLM fue propuesto por primera vez en 1974 por Church and Reville como una alternativa para enmendar las deficiencias del modelo SCM; tratar a todas las demandas de forma idéntica y la cantidad de instalaciones a localizar (Daskin, 1995), por ejemplo una compañía de renta de películas en los Estado Unidos de América, donde su política es cubrir tantos consumidores como sea posible, sujeto a un número límite de centros de distribución que puede operar dado el presupuesto de la empresa, donde el principal criterio de localización es que los consumidores estén cubiertos dentro de un radio que satisfaga la condición de estar a menos de un día de servicio postal del centro de distribución (Snyder, 2011). Para ejemplificar el planteamiento del modelo se recurre al ejemplo anterior aumentando los datos de demanda por nodo, y considerando el radio de cobertura de once unidades, la gráfica de la red es como se muestra en figura 6.

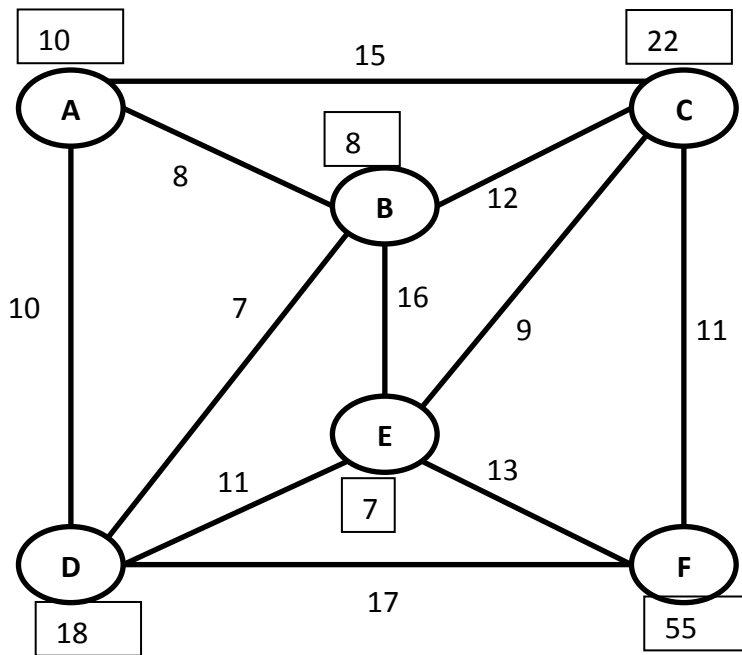


Figura 6. Red para el modelo de cobertura máxima

Donde las cifras dentro de los cuadros representan la demanda de películas por zona residencial y suponiendo que la empresa de renta de películas solo tiene la capacidad de localizar un expendio y el interés es maximizar la demanda cubierta se tiene el siguiente planteamiento:

*F.O maximizar  $10Z_A + 8Z_B + 22Z_C + 18Z_D + 7Z_E + 55Z_F$  ; el objetivo de esta función es maximizar la demanda cubierta y se describe matemáticamente como  $\sum_i h_i Z_i$  dicho en otras palabras como la sumatoria de la demanda ( $h_i$ ) por nodo ( $Z_i$ ) donde  $Z_i = 1$  si el nodo es cubierto y 0 de lo contrario.*

*s. t.*

$$X_A + X_B + X_D \geq Z_A ; \text{cobertura del nodo A}$$

$$X_A + X_B + X_D \geq Z_B ; \text{cobertura del nodo B}$$

$$X_C + X_E + X_F \geq Z_C ; \text{cobertura del nodo C}$$

$$X_A + X_B + X_D + X_E \geq Z_D ; \text{cobertura del nodo D}$$

$$X_C + X_D + X_E \geq Z_E ; \text{cobertura del nodo E}$$

$$X_A + X_B \geq Z_F ; \text{cobertura del nodo F}$$

$X_A + X_B + X_C + X_D + X_E + X_F \leq 1$ ; esta última restricción está ligada al número de expendios a localizar y matemáticamente se expresa como  $(\sum_j X_j \leq P)$  la sumatoria de nodos ( $X_j$ ) menor o igual a la cantidad disponibles de recursos a localizar (  $P$  ) donde  $X_j = 1$  si se localiza el recurso en el nodo  $j$  y 0 de lo contrario.

La solución a este modelo es localizar el expendio en el nodo C cubriendo una demanda máxima de 84 unidades, por la formulación general del problema los resultados se obtienen mediante programación entera, sección 2.3, empleando el software de modelación, Lindo, sección 2.4.

### 1.2.2. Métodos de solución existentes

La manera de dar solución a modelos de cobertura dependerá del enfoque y características del mismo, varias tentativas de solución incluyen: programación entera, programación no lineal, programación dinámica (Schmid, 2012). Referente a los modelos de cobertura se plantean y resuelven mediante programación lineal entera, tal es el caso de los ejemplos anteriores.

#### 1.2.2.1. Programación entera.

El problema de cobertura máxima ha sido resuelto de manera óptima mediante programación lineal (Church y Reville, 1974); la programación lineal permite modelar muchos problemas de interés práctico. Y modernos códigos de programación lineal permiten encontrar soluciones óptimas a problemas que presentan cientos de miles de restricciones y variables. La combinación de fuerza al modelado y solubilidad dan la importancia a la programación lineal (Bosch y Trick, 2005).

Los modelos de programación entera son empleados en una gran variedad de aplicaciones que van desde modelos de calendarización, asignación de

recursos, planeación, diseño de la cadena de suministro, diseño de subastas, y muchos otros más (Bosch y Trick, 2005), los problemas de localización a menudo suelen estar restringidos a valores discretos, esto es que no pueden ser valores fraccionarios (Taha, 2004) como lo es localizar centros de almacenamiento, ambulancias, etc. Sin embargo, la programación entera puede ser frustrante debido al hecho que dos formulaciones que aparentemente son idénticas para el mismo problema pueden conducir a experiencias computacionales radicalmente distintas, mientras una formulación puede ofrecer una solución en un menor tiempo, la segunda puede tomar más del doble de tiempo, existen varios consejos para desarrollar y resolver de manera exitosa modelos de programación entera, tales como: creatividad en la formulación, evitar simetrías, modificar los parámetros de branch and bound, considerar el número de restricciones y variables (Bosch y Trick, 2005).

#### 1.2.2.2. Lindo

Actualmente en el mercado de software disponible para modelar se pueden encontrar una amplia gama de productos. Sin embargo, Lindo ofrece características que son útiles para el modelado como se ve en la tabla 1.

Tabla 1. Características de Lindo

<b>Característica</b>	<b>Beneficio</b>
<b>Fácil expresión del modelo</b>	Permite formular modelos lineales, no lineales y enteros de manera rápida, permite escribirlos siguiendo la lógica con la cual se escribirían a mano.
<b>Convenientes opciones de datos</b>	Permite eliminar el tiempo de lidiar con las bases de datos ya que permite extraer la información directamente de hojas de datos como Excel.
<b>Poderosos Solvers</b>	Lindo dispone de solvers predeterminados dentro de su programación para modelos lineales, no lineales (convexos y no convexos) cuadráticos, estocásticos y enteros.



Estas características se ven reflejadas en las figuras 7 y 8 que muestran la interfaz que se tiene con el usuario y el lenguaje empleado en el programa.

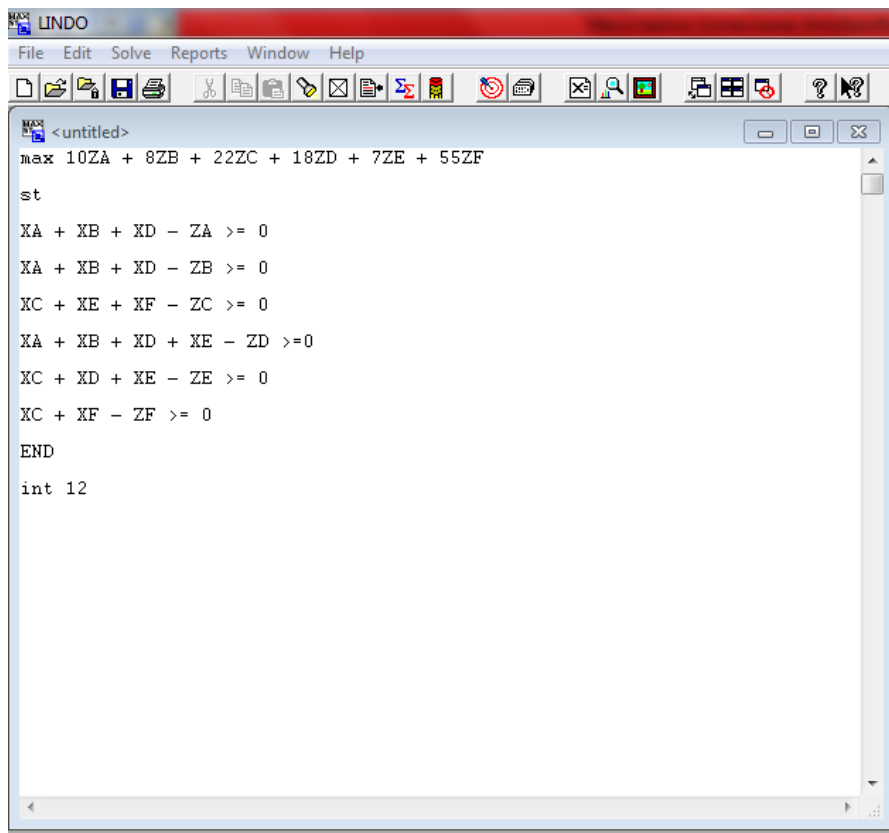


Figura 7. Pantalla de Lindo con el modelo de cobertura fija

Como se observa en la figura 7, el ejemplo del modelo de cobertura máxima es ingresado en la plataforma de Lindo. La manera de interactuar con el programa es a groso modo como se describe a continuación; al igual que si se escribiera a mano el modelo, se comienza por plantear la función objetivo este programa es sensible a la nomenclatura “max” o “min” dependiendo de la naturaleza del modelo, una vez plasmada la función objetivo se continua con la escritura de las restricciones, para que el programa pueda distinguir las restricciones se debe escribir “st” que son las siglas “subject to” “sujeto a” para las restricciones es muy importante que todas las variables se encuentren del lado izquierdo al signo de desigualdad y del lado derecho se encuentren valores numéricos, dependiendo de la versión que se tenga del programa se puede tener la capacidad de escribir 150 restricciones, 300 variables y hasta 50 variables enteras (solo para la versión demo), una vez concluido el grupo de ecuaciones

que describen las restricciones del modelo se debe escribir “end” para delimitar el modelo, para que el programa reconozca que son variables enteras se debe escribir “int” y el número de variables que se alinean a este criterio dentro del modelo o escribiendo variable por variable si se considera un modelo de programación mixta; una vez que se da la instrucción de solución al programa se despliega una pantalla como la figura 8 donde se muestran los resultados obtenidos.

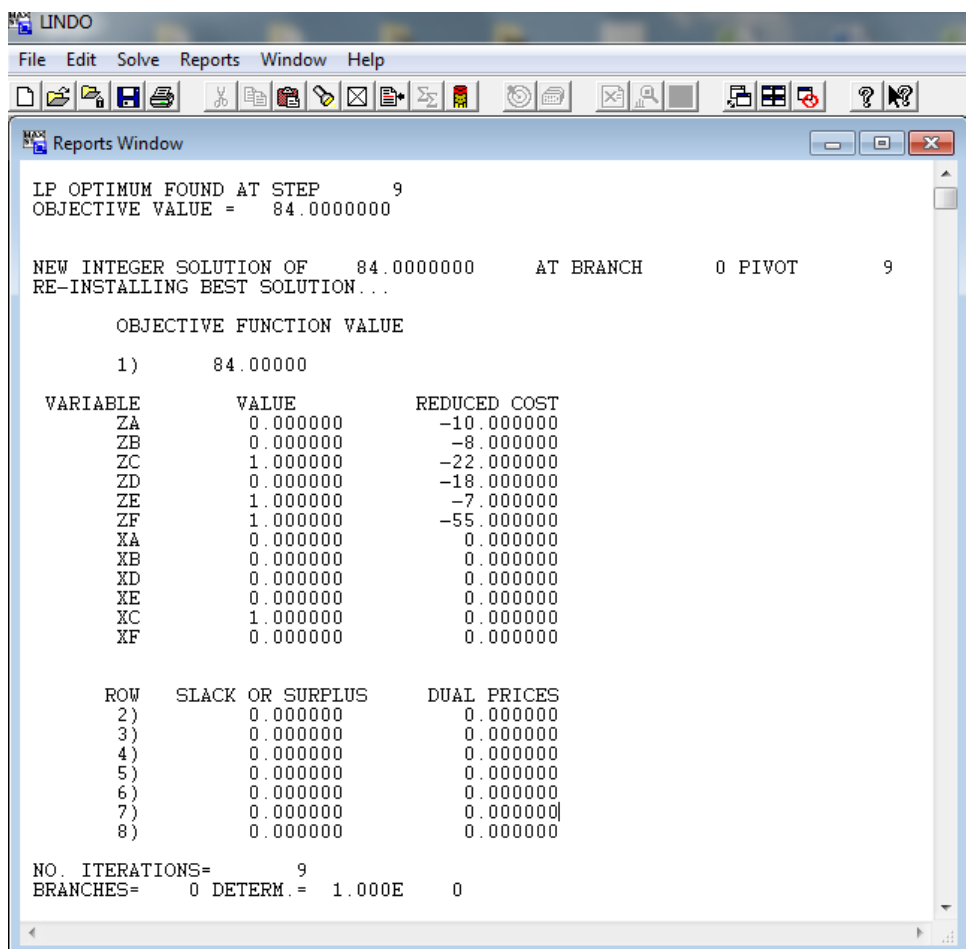


Figura 8. Pantalla de resultados obtenidos en Lindo

La pantalla de solución desplegada por el programa (figura 8) muestra el valor máximo de cobertura justo donde se puede leer “Objective value” y después se puede volver a leer el valor de la función objetivo debajo de “Objective function value”, el programa muestra las variables consideradas en el modelo así como sus valores, recordando el ejemplo del modelo de cobertura máxima la variable

de decisión es  $x_i$  que puede tomar valores de 1 y 0 se observa que la variable con valor igual a uno es XC por tal motivo se concluye que el nodo donde se localizara el expendio es el nodo C y al hacer esto se cubre una demanda máxima de 84.

### 1.3. Simulación

A lo largo del tiempo la simulación ha sido utilizada para modelar eventos y considerarlos a futuro, para que el servicio sea eficiente además de hacerlo oportuno, el uso de la simulación y el cuidado de la salud, puede ser una herramienta invaluable donde las ineficiencias pueden ser eliminadas permitiendo realizar un reordenamiento óptimo, la simulación ha sido utilizada en el ámbito de la salud principalmente para analizar los requerimientos de recursos así como de calendarización (Mark L. Weng, 1999), cuando se analizan estas alternativas, las medidas estándar de rendimiento son reportadas considerando diversos factores entre ellos los tiempos y longitud de líneas de espera.

La simulación es una importante herramienta de análisis que se ha usado en el ámbito administrativo en algunos aspectos del cuidado de la salud, principalmente maximizando la eficiencia del sistema en las áreas de atención.

En la toma de decisiones existen herramientas conocidas y probadas para problemas típicos, pero la realidad es muy compleja, donde debido a que la naturaleza de las variables que intervienen es puramente estocástica, la única opción práctica es utilizar la simulación, y en particular con el uso de la computadora digital se pueden analizar problemas más complejos donde debido a la cantidad de datos a procesar y el tipo de variables, las herramientas clásicas fallan o las soluciones que se obtienen resultan de una abstracción de la realidad demasiado simplificada y por ende produce soluciones poco satisfactorias, finalmente se presenta la situación actual en el servicio de ambulancias en Ciudad Universitaria y se define el área en particular en donde

se llevara a cabo el estudio, utilizando la simulación como herramienta para determinar la ocurrencia del evento.

Debido a su flexibilidad, además de su capacidad para poder obtener soluciones que sean implementadas en la realidad y que nos permita tomar en cuenta todos los factores que intervienen en la realidad de un sistema, se propone la simulación como una técnica apropiada para llevar a cabo el análisis y evaluación de este sistema.

### 1.3.1. Ventajas y desventajas

La simulación es una herramienta cada vez más utilizada en el estudio de sistemas complejos; entre las premisas a favor podemos encontrar las siguientes (García y Ortega, 2006):

- La mayoría de los sistemas complejos reales con elementos estocásticos no se pueden describir con suficiente precisión mediante un modelo matemático que se pueda resolver analíticamente. Así que, con frecuencia la simulación es el único método posible de estudio de dichos sistemas.
- Permite estimar el comportamiento de un sistema existente bajo un conjunto previsto de condiciones operativas.
- Se pueden comparar diseños alternativos (o políticas de operación alternativas para un determinado diseño) para especificar cuál es que cumple de forma más adecuada con los objetivos formulados.
- Se puede tener un mejor control sobre las condiciones del experimento que si se realizase sobre el propio sistema.
- Permite estudiar un sistema cuya evolución es muy dilatada en el tiempo en un periodo de tiempo reducido. Sucesivamente, también permite estudiar de forma detallada la evolución de un sistema en un corto periodo de tiempo.

Por otro lado, la simulación no solo conlleva ventajas, también puede generar algunos inconvenientes. Entre ellos se encuentran:

- Cada ejecución de un modelo estocástico de simulación da como resultado únicamente una estimación de las características o comportamiento del modelo para un conjunto particular de parámetros de entrada. Por lo tanto, no bastará con la ejecución del modelo una sola vez, sino que habrá que realizar una serie de repeticiones para obtener una muestra representativa del funcionamiento del sistema.
- Los modelos de simulación, por regla general, consumen una cantidad elevada de recursos técnicos y humanos durante un tiempo prolongado.
- La gran cantidad de información que puede proporcionar un modelo de simulación, junto a la capacidad de persuasión que tienen algunos paquetes con animación gráfica, hacen que, a menudo, se confíe en exceso en los resultados que proporcionan.

### 1.3.2. Simio

Simio es un software de simulación que permite construir y analizar modelos dinámicos en 3D de una amplia gama de sistemas, por ejemplo, fábricas, cadenas de suministro, departamentos de emergencias, aeropuertos sistemas de servicios entre otros. Simio emplea un enfoque de objetos en el modelado, donde los modelos son construidos mediante la combinación de objetos que representan los componentes físicos del sistema. Un objeto tiene su propio comportamiento personalizado definido por su modelo interno que responde a los eventos del sistema (Simio, 2010). En otras palabras cada objeto puede ser programado con propiedades que sirven para definir el comportamiento del objeto dentro del modelo.

## 2. Metodología

### 2.1. Toma de datos

Datos son los hechos que describen sucesos y entidades. Es una palabra en plural que se refiere a más de un hecho, son símbolos que describen condiciones, hechos situaciones o valores. Los datos se caracterizan por no contener ninguna información. Un dato puede significar un número, una letra, un signo ortográfico o cualquier otro símbolo que represente una cantidad, una medida, una palabra o una descripción.

La importancia de los datos está en su capacidad de asociarse dentro de un contexto para convertirse en información. Para ser útiles, los datos deben convertirse en información para ofrecer un significado, conocimiento ideas o conclusiones (Hernández, 2003).

Para puntualizar los datos son números que se comparan analizan e interpretan para estimar valores y escenarios futuros. Se identifica como población a los accidentes ocurridos dentro de las facultades de Ciudad Universitaria comprendidos en el periodo 2008 – 2011, recabados de los reportes de servicios brindados por DGSM en su atención pre hospitalaria.

### 2.1.1. Selección de la información

La información recabada se obtuvo de los campos lugar, día de la semana, tipo de usuario (alumno, empleado, otros) considerando para el periodo analizado 1919 datos (anexo 1). Mismos que se concentran y ordenan en la tabla 2.

Tabla 2. Concentrado de datos analizados

<b>Concentrado</b>	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>J</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>D</i>	Total
Arquitectura	12	16	10	13	9	6	3	69
C. Políticas	16	23	8	19	27	10	3	106
Cele	8	17	10	11	4	1	1	52
Ciencias	35	43	62	49	39	9	2	239
Contaduría	29	29	34	37	34	9	3	175
Derecho	32	46	35	36	54	12	6	221
Economía	12	9	13	13	15	3	2	67
Filosofía	31	39	30	43	38	15	11	207
Ingeniería	17	19	17	23	21	2	3	102
Medicina	26	25	29	29	31	9	7	156
Odontología	26	19	20	22	20	6	3	116
Psicología	12	10	17	14	14	2	1	70
Química	18	23	24	29	32	4	2	132
T. Social	4	7	11	11	10	0	1	44
Vet. Y Zoo.	10	22	19	12	11	4	3	81
Anexo Ing.	11	11	18	12	10	3	0	65
<b>Total</b>	<b>299</b>	<b>358</b>	<b>357</b>	<b>373</b>	<b>369</b>	<b>95</b>	<b>51</b>	

Para facilitar el análisis de los datos se distribuyeron en zonas como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Distribución de zonas para el análisis.

Ref.	Zona	Facultad	Facultad	Facultad
<b>ZB</b>	1	Derecho	Economía	
<b>ZC</b>	2	Medicina	Odontología	
<b>ZD</b>	3	Ingeniería	CEle	Arquitectura
<b>ZE</b>	4	Filosofía	Biblioteca Central	
<b>ZF</b>	5	Ciencias Políticas		
<b>ZG</b>	6	Ciencias		
<b>ZH</b>	7	Contaduría	Administración	
<b>ZI</b>	8	Psicología		
<b>ZJ</b>	9	Química		
<b>ZK</b>	10	Trabajo Social		
<b>ZL</b>	11	Veterinaria	Zootecnia	
<b>ZM</b>	12	Anexo de Ingeniería		

### 2.1.2. Pruebas de bondad de ajuste

La prueba de bondad de ajuste compara la distribución de frecuencias observada de una variable usualmente cualitativa, pero que también puede ser cuantitativa y discreta (como las variables consideradas en este trabajo), con la



distribución de frecuencias de la misma variable medida en un grupo de referencia. El propósito de la prueba es averiguar si existen diferencias estadísticamente significativas entre la distribución observada y la distribución esperada (Reynaga, 2012).

La prueba Kolmogorov – Smirnov (Chakravart, Laha, y Roy, 1967) es usada para decidir si una muestra proviene de una población con una distribución específica. La prueba Kolmogorov – Smirnov (K-S) se basa en la función de distribución empírica (ECDF). Dados  $N$  puntos de datos ordenados  $Y_1, Y_2, \dots, Y_N$ , la ECDF se define como:

$$E_N = n(i)/N$$

Donde  $n(i)$  es el número de puntos menor que  $Y_i$  y los  $Y_i$  están ordenados desde el menor hasta el mayor valor. Esta es una función de paso que incrementa por  $1/N$  en el valor de cada punto ordenado de datos.

Prueba Anderson – Darling: La prueba Anderson – Darling (Stephens, 1974) es usada para probar si una muestra de datos proviene de una población con una cierta distribución. Es una modificación de la prueba Kolmogorov – Smirnov (K-S) y otorga mayor peso a las colas que la prueba K-S. La prueba K-S es libre de distribución en el sentido que los valores críticos no dependen de la distribución a ser probada (nótese que esto es cierto solo para una distribución totalmente especificada, es decir cuando los parámetros son conocidos). La prueba Anderson – Darling hace uso de la distribución específica en calcular valores críticos. Esto tiene la ventaja de permitir una prueba más sensible y la desventaja que los valores críticos deben ser calculados para cada distribución.

### 2.1.3. Ajuste de los datos de Ciudad Universitaria (CU)

Los datos fueron ajustados a distribuciones de probabilidad de Poisson. Esta distribución describe la frecuencia de aparición de eventos en un proceso de llegadas, puede formalizarse al especificar el tiempo entre dos llegadas sucesivas, o especificando el número de eventos de llegada por intervalo

(Flores de la Mota, 2006) tal como pueden ser las demandas de servicio, mediante el uso de software especializado, conocido como Easyfit, se ajustaron estas frecuencias a una distribución de Poisson.

## 2.2. Modelo de localización

La elección de la localización se encuentra directamente asociada con la eficiencia del servicio, en su mayoría dicha eficiencia no se encuentra en la complejidad en el sistema que se pueda construir, sino en el grado de sencillez que este pueda ser operado, dado que la elección no solo significa el análisis de los datos duros directamente relacionados, sino en la contemplación de todos los factores del entorno que puedan interferir en la realización del servicio, la elección debe entenderse como una cadena de situaciones tanto internas como externas las cuales pueden afectar el grado de veracidad del modelo, debemos partir desde la idea que ninguna decisión debe entenderse como inapelable dado que la utilización de distintos modelos puede afectar en gran medida el resultado que estos pueden brindar, así como también un cambio en el entorno puede afectarlos.

### 2.2.1. Selección del modelo

Como se menciona en la sección anterior el grado de sencillez es un factor que permite la selección del modelo a utilizar, siendo este el MCLM, debido a que se ha probado con anterioridad su eficacia. Se consideró el MCLM para planear la organización del servicio de emergencias médicas en Austin, Texas, el plan propuesto ha ahorrado a la ciudad \$3.4 millones de dólares en costos de construcción y \$1.2 millones de dólares anualmente en costos de operación, además es importante mencionar que el tiempo de respuesta promedio ha sido reducido a pesar del incremento en la demanda de servicio (Daskin, 1995).

### 2.2.2. Planteamiento del MCLM

En la sección 2.1.3.2 se describe un ejemplo del MCLM donde se plantea el localizar expendios de renta de películas, pero no se mostró la formulación matemática del MCLM. Formulación que será descrita a continuación.

Maximizar:

$$\sum_i h_i Z_i$$

Sujeto a:

$$Z_i \leq \sum_j X_j \quad \forall i$$

$$\sum_j X_j \leq P$$

$$X_j = 0,1$$

$$Z_i = 0,1$$

Donde

$h_i$  = demanda en el nodo  $i$

$P$  = número de ambulancias a localizar

$Z_i = \begin{cases} 1 & \text{si el nodo } i \text{ es cubierto} \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}$

$X_j = \begin{cases} 1 & \text{si se localiza al candidato en el sitio } j \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}$

Para el modelo de localización de ambulancias se considera un nodo por zona, la demanda de cada zona es estimada con base en los registros históricos (recolección de datos), y la cantidad de recursos (ambulancias) a localizar es igual al número de ambulancias con las que cuenta Ciudad Universitaria para brindar su servicio pre hospitalario.

Se considera la distancia entre zonas como el criterio para el formulado de las restricciones; estas distancias fueron obtenidas mediante información geográfica obtenida a través de software que permite visualizar múltiple cartografía, con base en fotografía satelital y que su forma de desplazarse es intuitiva y sencilla además de contar con una versión gratuita, mejor conocido como Google Earth. Estas distancias entre zonas en km están concentradas en la tabla 4.

Tabla 4. Distancias entre zonas en km

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>M</b>
<b>Zona</b>	<b>DGSM</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>DGSM</b>	0	1.2	1.5	0.7	1	2.9	1.7	1.6	0.9	0.8	2	0.9	1.2
<b>1</b>	1.85	0	0.5	1.6	1	3.2	2.6	1.9	0.8	1.2	2.3	1.1	1.5
<b>2</b>	1.39	1.4	0	1.1	2	2.8	1.6	1.4	1.8	0.7	1.8	0.7	1.1
<b>3</b>	0.27	1.4	1.8	0	1.1	3.2	2	1.8	1	1	2.1	1.2	1.5
<b>4</b>	2.23	0.4	.09	2	0	3.6	2.4	2.3	0.6	1.5	2.6	1.5	1.9
<b>5</b>	2.82	3.2	3.1	2.9	3.7	0	1.8	2.1	3.2	2.4	2.1	2.4	2.9
<b>6</b>	2	2	2	1.7	2.1	2	0	0.3	2.1	1.3	0.7	0.7	1.1
<b>7</b>	1.43	2.3	2.7	1.8	2	2	1	0	2	2	0.4	1.4	1.8
<b>8</b>	2.67	1.2	1.3	2.4	1.7	4	2.8	2.7	0	2	3.1	1.9	2.4
<b>9</b>	0.75	1.9	2.3	0.5	1.5	2.5	1.1	1	1.4	0	1.4	0.4	0.6
<b>10</b>	1	1.9	2.3	1.5	1.5	2	1.1	1.4	1.4	1.9	0	1.7	2
<b>11</b>	1.3	2.4	2.9	1.1	2.1	2.1	1.4	1.3	2	0.6	1.7	0	0.9
<b>12</b>	1.85	2.2	1.8	1.5	2.6	2.1	0.6	0.4	2.2	1.1	0.8	0.5	0

El modelo MCLM para la localización de las ambulancias de Ciudad Universitaria se describe de la siguiente manera:

Función objetivo

Ecuación 1

$$\begin{aligned} \text{MAX } & h_B Z_B + h_C Z_C + h_D Z_D + h_E Z_E + h_F Z_F + h_G Z_G + h_H Z_H + h_I Z_I + h_J Z_J \\ & + h_K Z_K + h_L Z_L + h_M Z_M \end{aligned}$$

Sujeto a:

Ecuación 2

$$X_C + X_D + X_E + X_H + X_I + X_J + X_L + X_M \geq Z_B$$

Ecuación 3

$$X_B + X_D + X_E + X_G + X_H + X_I + X_J + X_K + X_L + X_M \geq Z_C$$

Ecuación 4

$$X_B + X_C + X_E + X_G + X_H + X_I + X_J + X_L + X_M \geq Z_D$$

Ecuación 5

$$X_B + X_C + X_D + X_I + X_J + X_L + X_M \geq Z_E$$

Ecuación 6

$$X_G \geq Z_F$$

Ecuación 7

$$X_C + X_D + X_H + X_J + X_K + X_L + X_M \geq Z_G$$

Ecuación 8

$$X_D + X_E + X_F + X_G + X_I + X_J + X_K + X_L + X_M \geq Z_H$$

Ecuación 9

$$X_B + X_C + X_E + X_J + X_L \geq Z_I$$

Ecuación 10

$$X_B + X_D + X_E + X_G + X_H + X_I + X_K + X_L + X_M \geq Z_J$$

Ecuación 11

$$X_B + X_D + X_E + X_F + X_G + X_H + X_I + X_J + X_L + X_M \geq Z_K$$

Ecuación 12

$$X_D + X_G + X_H + X_I + X_J + X_K + X_M \geq Z_L$$

Ecuación 13

$$X_C + X_D + X_G + X_H + X_J + X_K + X_L \geq Z_M$$

Ecuación 14

$$X_B + X_C + X_D + X_E + X_F + X_G + X_H + X_I + X_J + X_K + X_L + X_M \leq 4$$

$$Z_i = 1,0 \quad i = B, C, D, \dots, M$$

$$X_i = 1,0 \quad i = B, C, D, \dots, M$$

Donde de **1** tenemos que  $h_i$  es la demanda en el lugar  $i$ , demandas brindadas por el modelo de simulación, y  $Z_i$  es igual a uno si el nodo  $i$  es cubierto por un recurso, cero de lo contrario, esta función maximiza las demandas cubiertas por las ambulancias.

De las restricciones **2** a **11** tenemos que cada una asegura que todo nodo este cubierto con base a la restricción de una distancia no mayor a dos km por al menos un recurso, de las ecuaciones **2** a **14** se tiene que  $X_i$  toma valores de uno si se localiza un recurso en el nodo  $i$  y cero de lo contrario, de la ecuación **14** se garantiza que solo se localizaran el máximo número de recursos disponibles, que en el caso de este trabajo de investigación es un valor de cuatro ambulancias.

### 2.3. Modelo de simulación

Para efectuar un análisis de un proceso es necesario conocerlo. En general, se desea llegar a conocer factores (internos y externos) que condicionan el comportamiento del mismo, tales como interacciones entre variables, el efecto de las perturbaciones, rangos de estabilidad, el efecto de la variación de parámetros etc. El mayor conocimientos del proceso se obtiene mediante la experimentación, la cual generalmente no se puede desarrollar con profundidad, debido a esta situación se debe recurrir a medios alternativos tales como la simulación de los experimentos en modelos del proceso completo o en modelos parciales de los fenómenos de interés.

Diseñar un buen proyecto de simulación es uno de los aspectos más difíciles si se quiere resolver un problema real. Sin embargo se puede considerar una serie de características que debe tener un buen proyecto de simulación, para

que se tenga la oportunidad de usar la creatividad al planear un modelo y encontrar la solución (Flores de la Mota, 2006). El modelo concebido para esta simulación es como se muestra en figura 9, considerando que cada zona corresponde a cada facultad que se encuentra en Ciudad Universitaria.

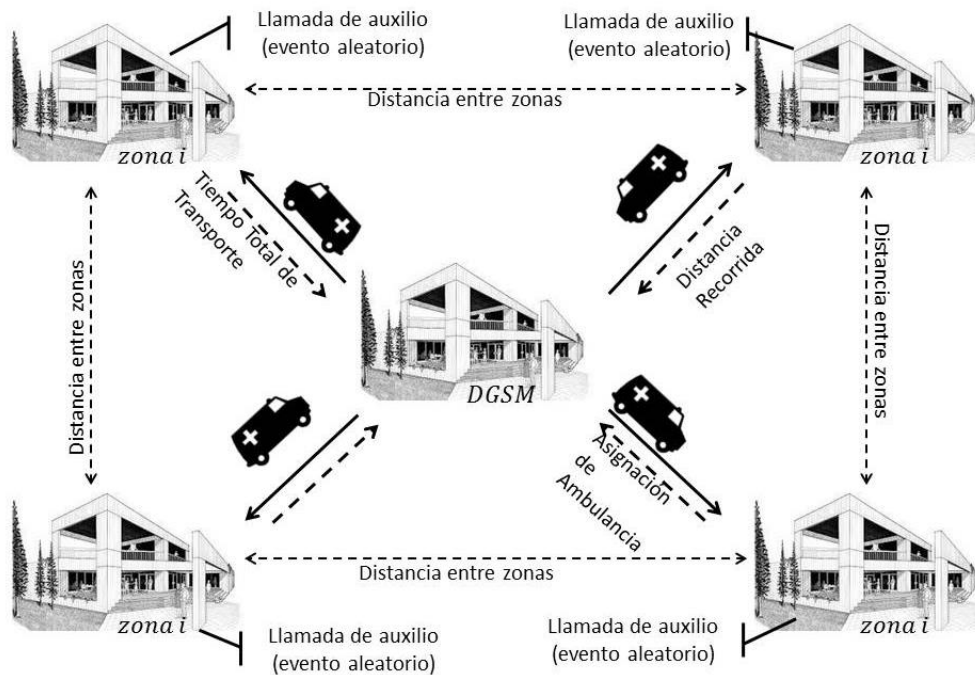


Figura 9. Elementos considerados para la construcción del modelo de simulación

La figura 9 muestra los elementos considerados en el modelo de simulación diseñado para analizar la atención pre hospitalaria dentro de Ciudad Universitaria siguiendo la siguiente metodología para la construcción del modelo de simulación en simio descrita en la figura 10.

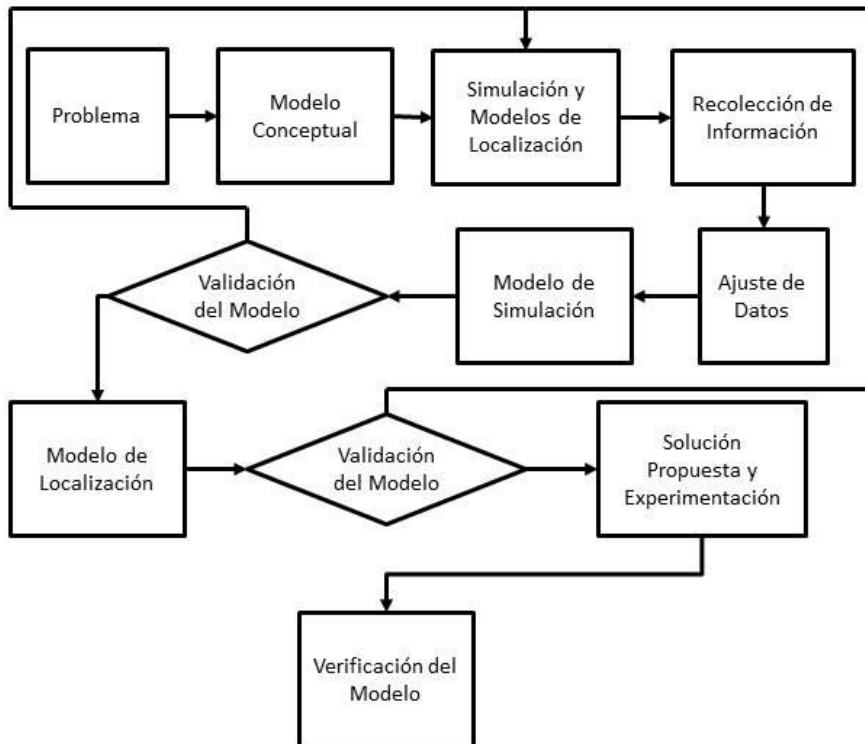


Figura 10. Metodología para la construcción del modelo

Las figuras 11 y 12 muestran el modelo construido en Simio donde se destaca el uso del croquis que muestra la distribución de las zonas de interés dentro de Ciudad Universitaria, así como las vías de tránsito vehicular consideradas en el modelo de simulación.



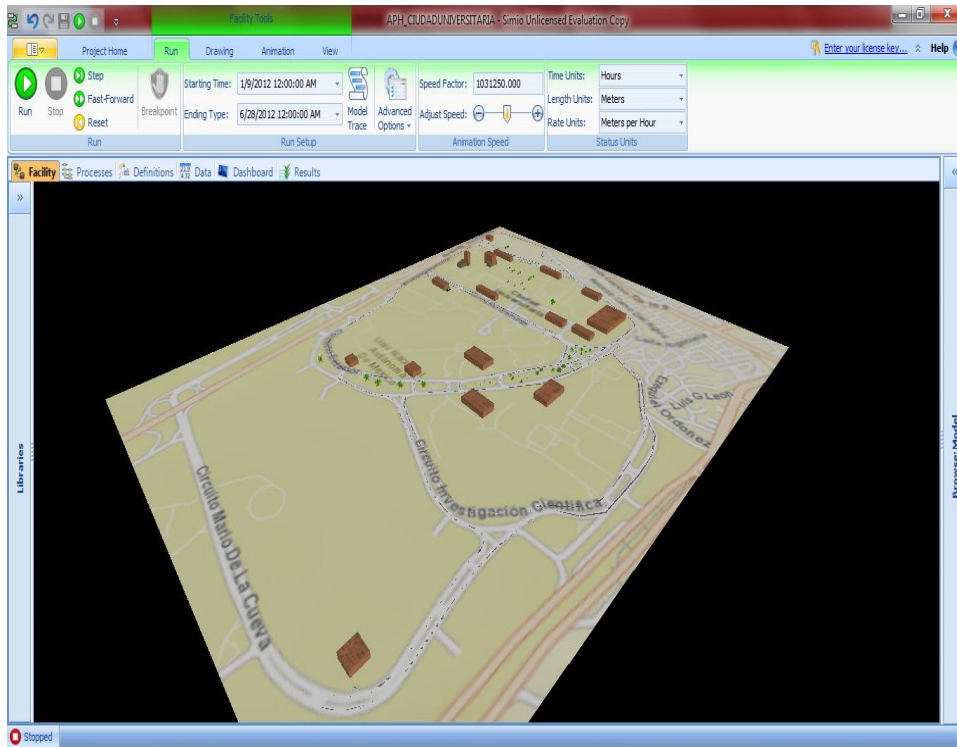


Figura 11. Modelo de simulación en Simio, vista 3D

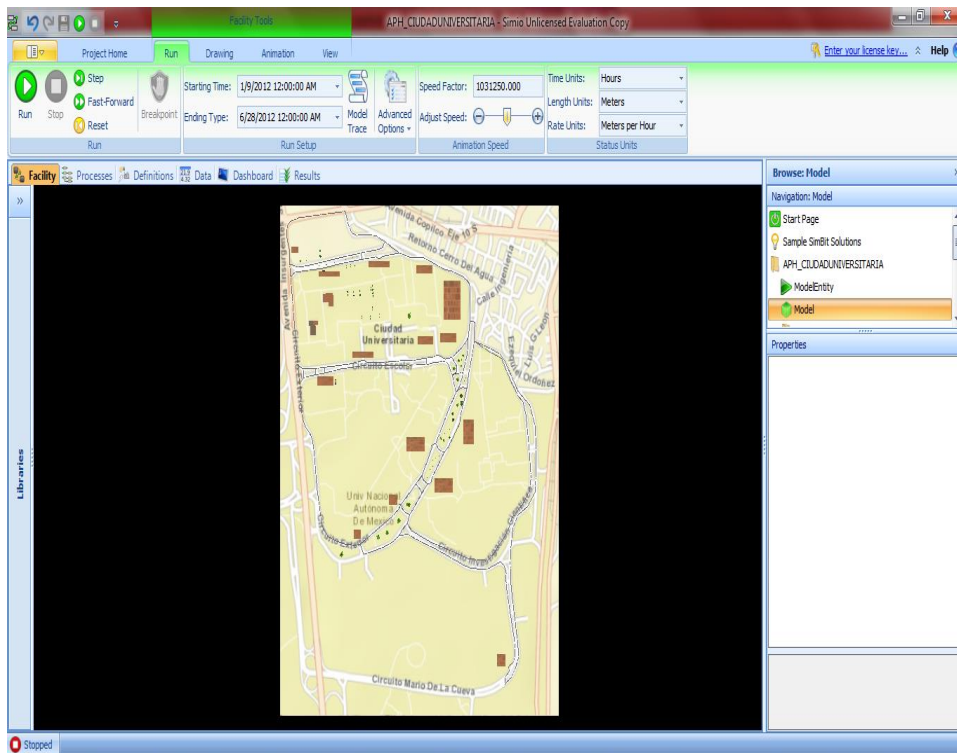


Figura 12. Vista superior del modelo de simulación en Simio

### 2.3.1. Escenarios

Los diferentes escenarios que son analizados en el modelo de simulación se basan en las diferentes distancias entre nodos que se pueden considerar en el modelo de localización, así como un escenario base donde el modelo de localización no es empleado, la tabla 5 muestra dichos escenarios. Cada escenario es un intento por mejorar (reducir) el tiempo de transporte y para cada escenario se deben plantear las restricciones acorde al criterio del escenario.

Tabla 5. Escenarios propuestos

Nombre del modelo	Criterio
a	Ambulancias localizadas en DGSM
b	Distancia entre zonas menor igual 2 km
c	Distancia entre zonas menor igual 1.7 km
d	Distancia entre zonas menor igual 1.5 km
e	Distancia entre zonas menor igual 1.1 km

### 3. Resultados

#### 3.1. Datos

Uno de los primeros resultados que se pueden obtener mediante el análisis de la información recabada es la cantidad de eventos por facultad en el periodo analizado que requirieron de atención por parte de DGSM en su servicio pre hospitalario como se muestra en la figura 13.

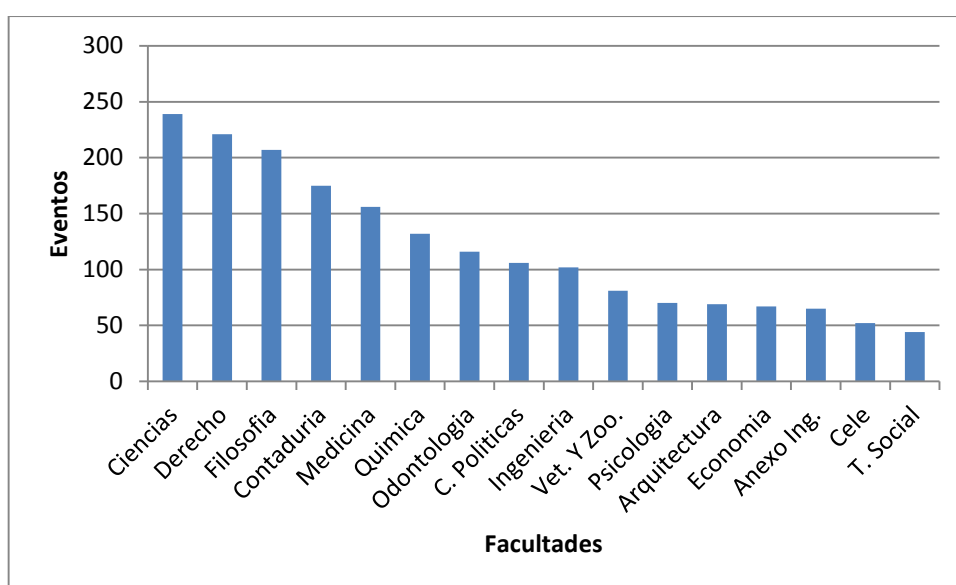


Figura 13. Cantidad de eventos atendidos por facultad

Como proyecto alterno se propone investigar a fondo las causas por las que facultades como ciencias y derecho representan el 80% de eventos que requieren atención pre hospitalaria y como mitigar esta situación.

De los datos obtenidos y el análisis de la información se destaca que la población que mayor hace uso del servicio de la atención pre hospitalaria son los estudiantes como se muestra en la figura 14 que señala el porcentaje de utilización por tipo de usuario por zona.

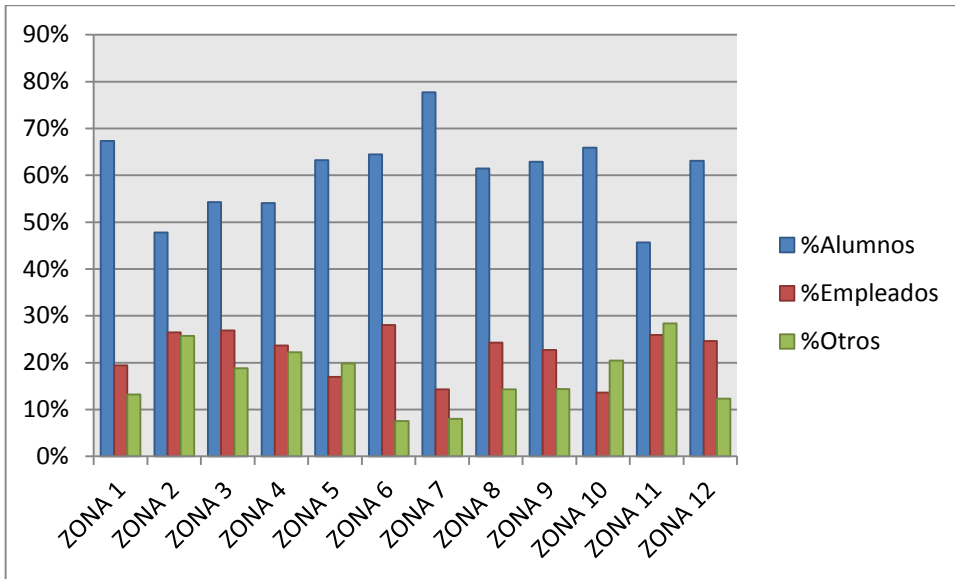


Figura 14. Porcentaje de utilización por tipo de usuario y por zona

De la misma manera se propone una investigación que permita identificar las causas de esta situación y acciones que disminuyan esta realidad.

### 3.1.1. Ajuste de los datos de Ciudad Universitaria (CU)

Como se menciona en la sección 1.3 de la metodología el ajuste de datos se realizó mediante el uso del software Easyfit; software que permite el fácil ajuste y calcula pruebas de bondad así como los parámetros estadísticos para dicho ajuste, para los datos de CU se tienen las figuras 15, 17 y 19 que muestran el ajuste obtenido por zona así como sus respectivos parámetros estadísticos figuras 16, 18 y 20, para las zonas 1, 7 y 10.

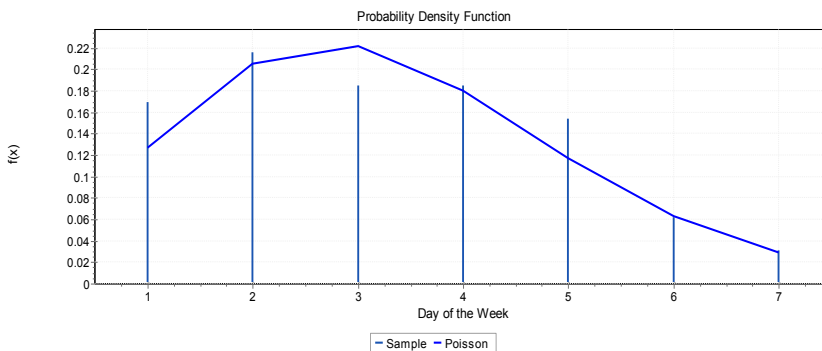


Figura 15. Función de probabilidad para la zona 1

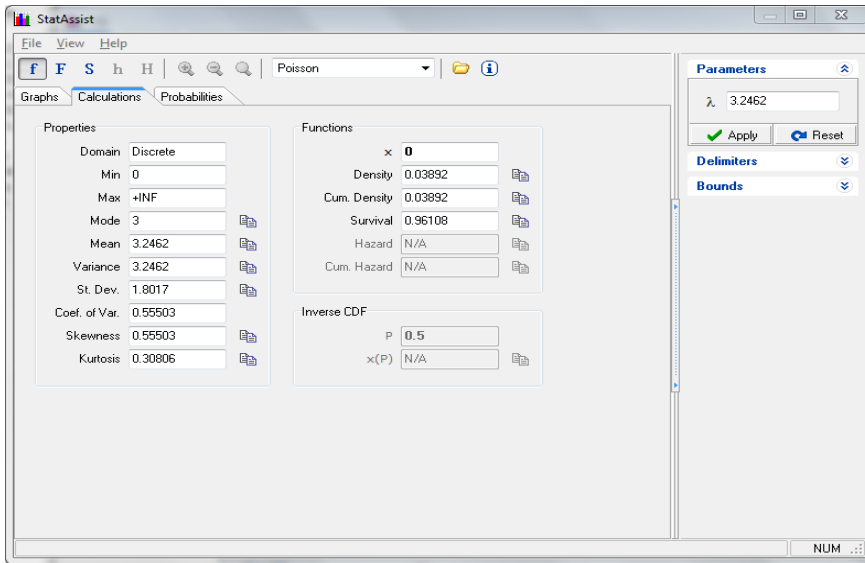


Figura 16. Parámetros estadísticos de la zona 1

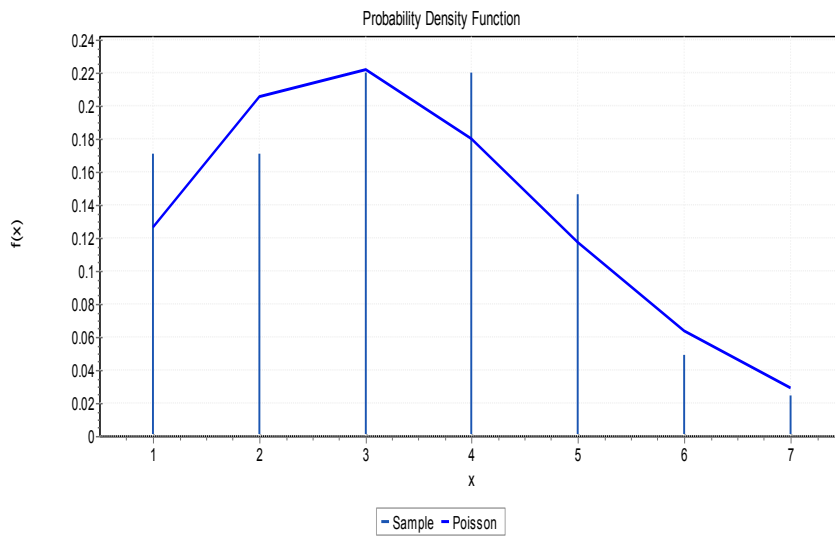


Figura 17. Función de probabilidad para la zona 7

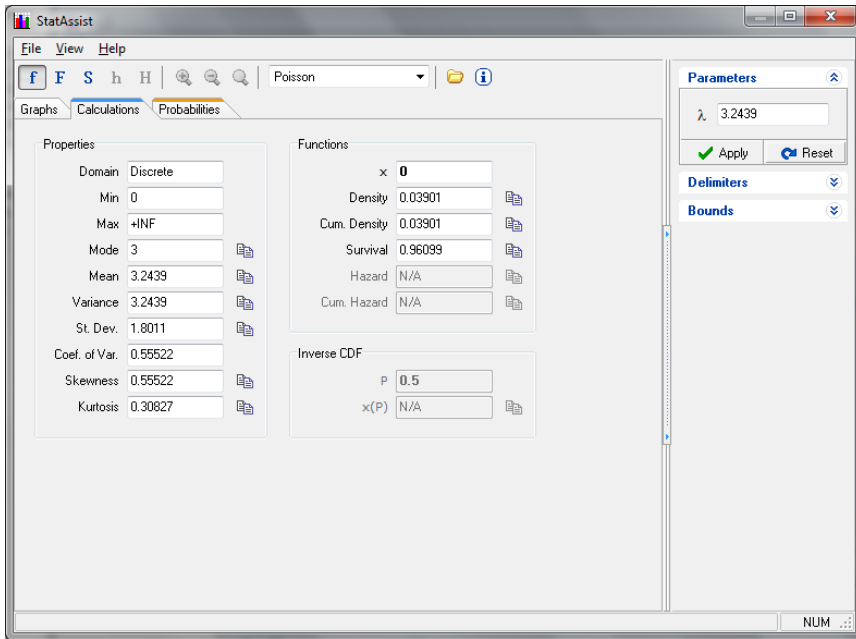


Figura 18. Parámetros estadísticos de la zona 7

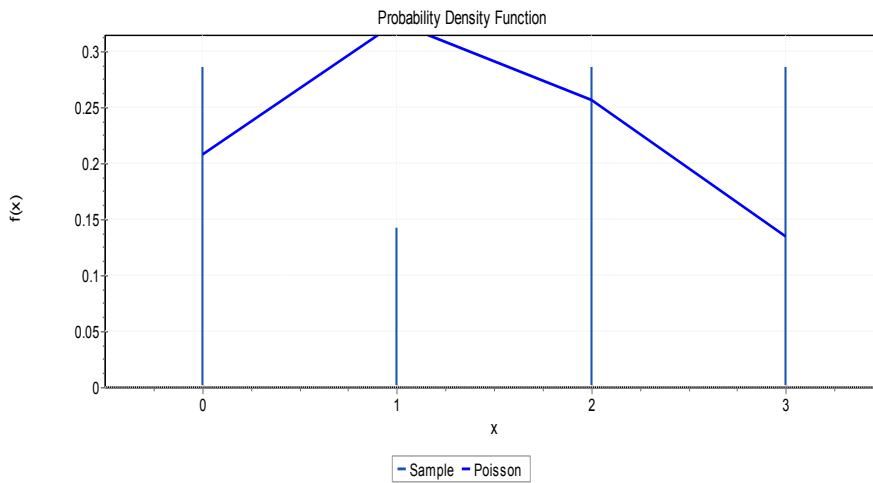


Figura 19. Función de probabilidad para la zona 10

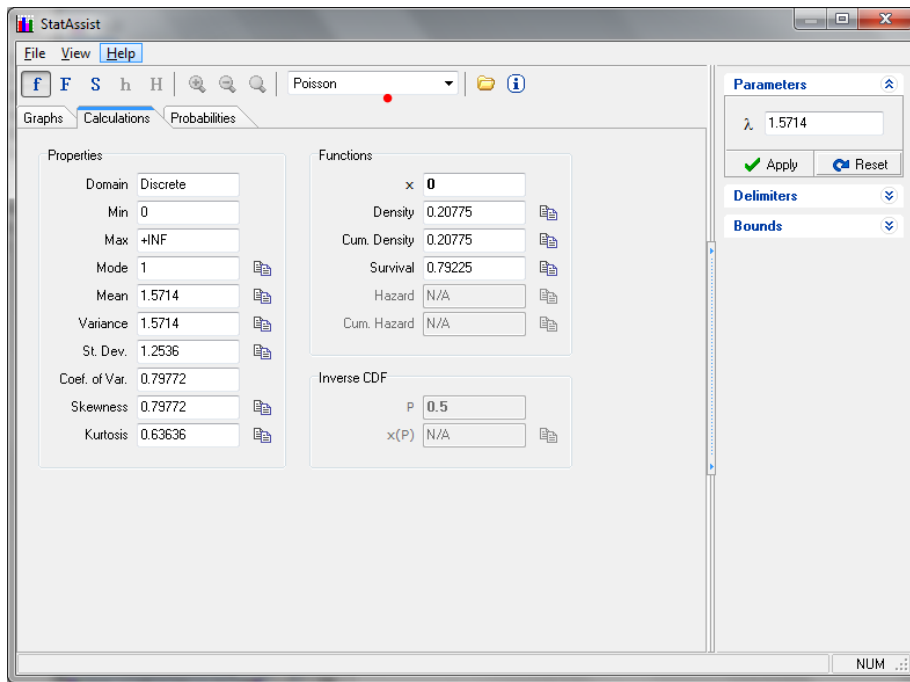


Figura 20. Parámetros estadísticos de la zona 10

De las figuras 16, 18 y 20, se distinguen parámetros estadísticos que permiten un análisis más profundo como la media, moda, mediana, desviación estándar, varianza entre otros.

Los valores de los parámetros estimados considerando la distribución de probabilidad de Poisson para cada zona se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Parámetros estimados para cada zona considerando una distribución de probabilidad de Poisson.

Zona	$\lambda$
1	3.2462
2	3.303
3	3.1667
4	3.451
5	3.5926
6	3.1667

Zona	$\lambda$
7	3.2439
8	3.3333
9	3.3125
10	3.7692
11	3
12	3.2174

### 3.2. Modelo de localización

Tal y como se establece en la sección 2.4 del marco teórico se usa Lindo para dar solución al modelo MCLM planteado para la localización de ambulancias dentro de Ciudad Universitaria, la figura 21 detalla el planteamiento del modelo en el programa elegido.

```

LINDO
File Edit Solve Reports Window Help
C:\Users\Alexander\Desktop\tesis.ltx
max 8ZB + 9ZC + 9ZD + 7ZE + 8ZF + 8ZG + 7ZH + 8ZI + 8ZJ + 7ZK + 10ZL + 9ZM
st
XC + XD + XE + XH + XI + XJ + XL + XM - ZB >= 0
XB + XD + XE + XG + XH + XI + XJ + XK + XL + XM - ZC >= 0
XB + XC + XE + XG + XH + XI + XJ + XL + XM - ZD >= 0
XB + XC + XD + XI + XJ + XL + XM - ZE >= 0
XG - ZF >= 0
XC + XD + XH + XJ + XK + XL + XM - ZG >= 0
XD + XE + XF + XG + XI + XJ + XK + XL + XM - ZH >= 0
XB + XC + XE + XJ + XL - ZI >= 0
XB + XD + XE + XG + XH + XI + XK + XL + XM - ZJ >= 0
XB + XD + XE + XF + XG + XH + XI + XJ + XL + XM - ZK >= 0
XD + XG + XH + XI + XJ + XK + XM - ZL >= 0
XC + XD + XG + XH + XJ + XK + XL - ZM >= 0
XB + XC + XD + XE + XF + XG + XH + XI + XJ + XK + XL + XM = 4
END
int 24

```

Figura 21. Planteamiento del modelo de localización de ambulancias en Lindo



### 3.2.1. Resultado del modelo MCLM

Una vez que el modelo es planteado bajo la estructura de Lindo se calcula su solución; la figura 22 muestra la pantalla que despliega Lindo después de estimar la solución al modelo MCLM.

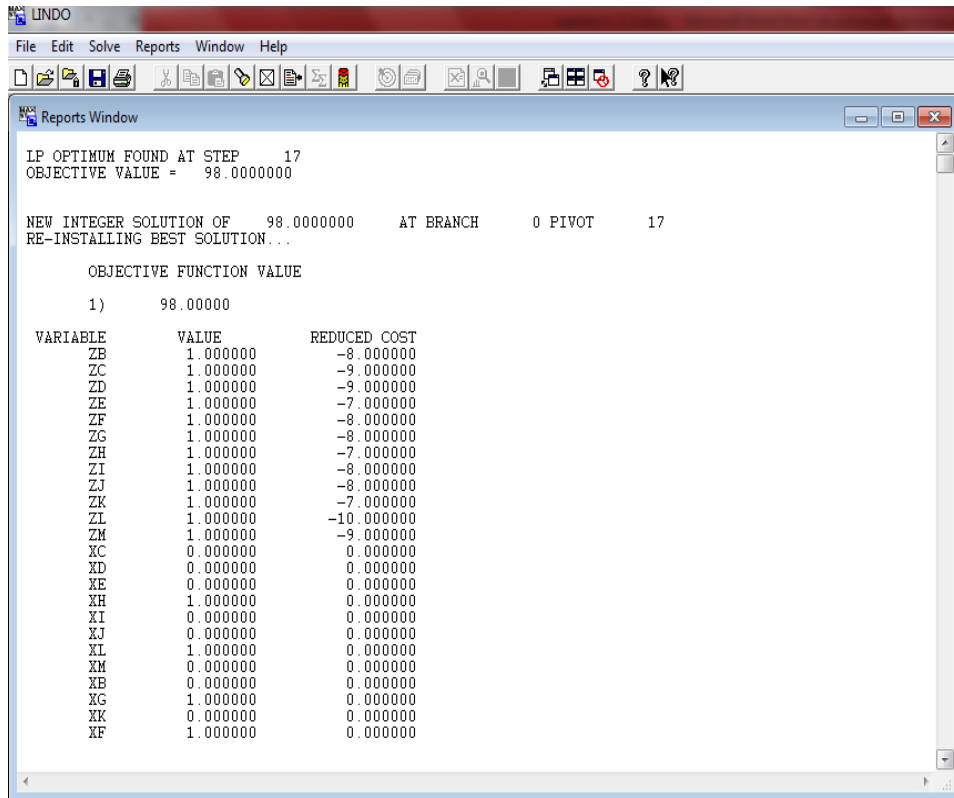


Figura 22. Resultados del modelo de ambulancias en Lindo

Como se explica en la sección 2.4 del marco teórico la lectura de la pantalla de Lindo indica que las ambulancias serán localizadas acorde a la tabla 7 para alcanzar la máxima cobertura de la demanda del servicio de atención pre hospitalaria acorde al escenario b.

**Tabla 7. Zonas resultado del modelo de localización**

NODO	ZONA	ESCUELA
XH	7	Contaduría y Administración
XL	11	Veterinaria y Zootecnia
XG	6	Ciencias
XF	5	Ciencias Políticas

### 3.3. Modelo de simulación

El modelo planteado en Simio es estudiado a través de 10 diferentes semillas (corridos de simulación) para la generación de números aleatorios; cuando una simulación usa números aleatorios, típicamente se quiere usar diferentes secuencias de números aleatorios, para variar esta secuencia, se debe variar la semilla (seed) en que la secuencia de números aleatorios está basada (Mathworks, 2008). En las figuras 23, 24, 25, 26 y 27 se muestran los resultados obtenidos del modelo, la variable en la cual se centra la comparación es el tiempo de transporte que es calculado en el programa (Simio) tomando en cuenta la velocidad asignada a cada ambulancia acorde a la ley de tránsito vigente y las distancias consideradas. Así como los valores generados para cada semilla de cada zona a lo largo de seis meses de simulación.

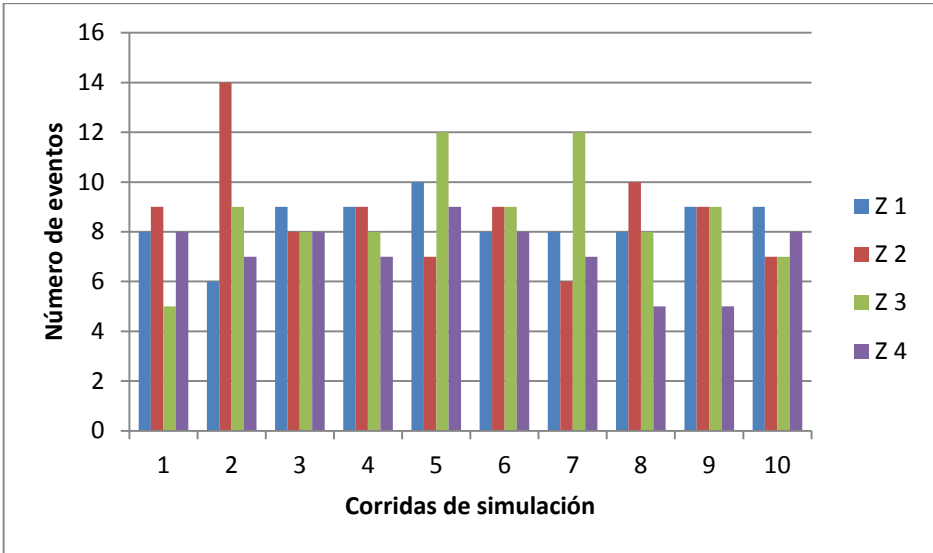


Figura 23. Eventos por zona en diez corridas de simulación

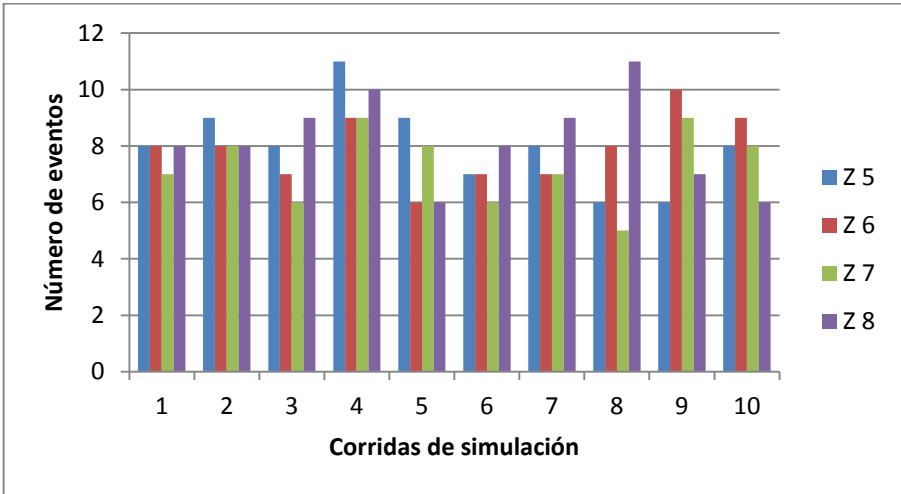


Figura 24. Eventos por zona en diez corridas de simulación

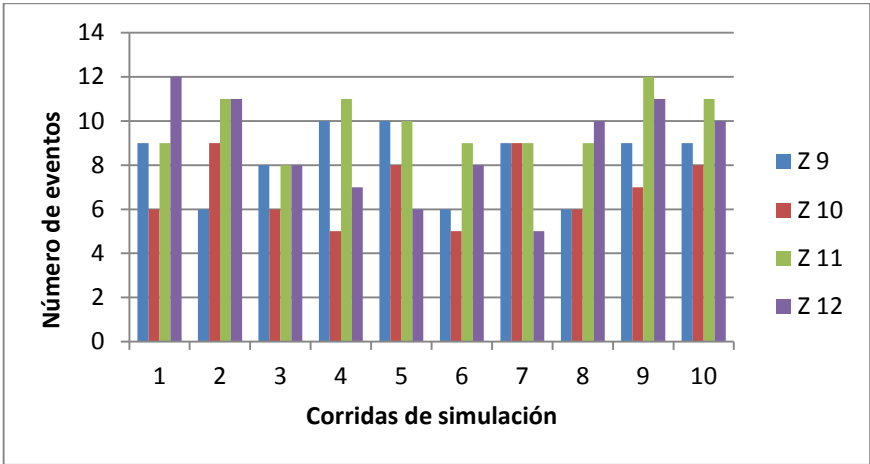


Figura 25. Eventos por zona en diez corridas de simulación

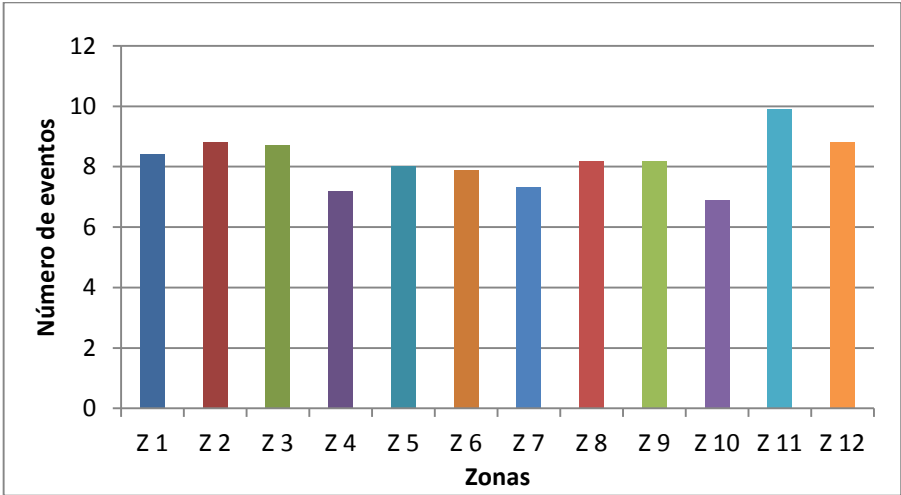


Figura 26. Promedio de eventos por zona

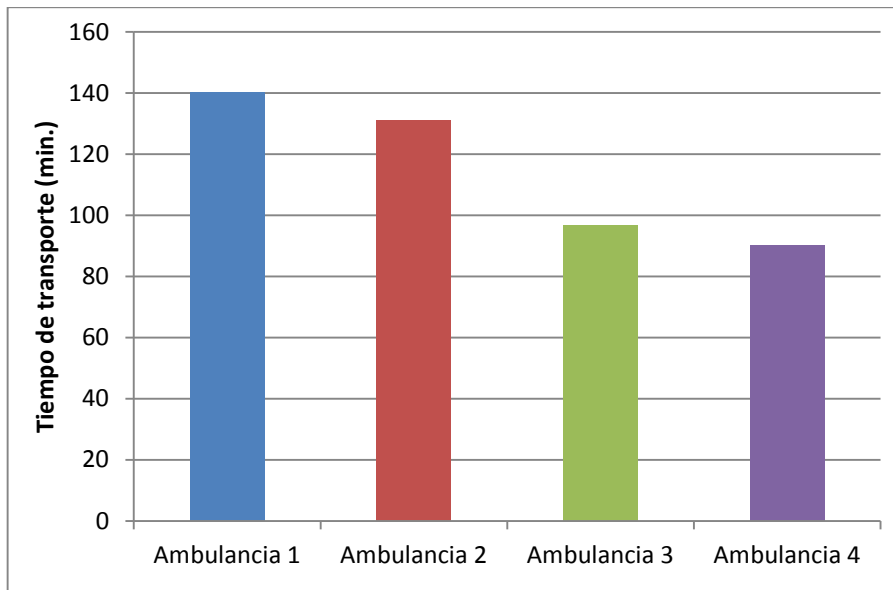


Figura 27. Tiempo de transporte (min) de las ambulancias

### 3.3.1. Escenario b

La variable en la cual se centra la comparación es el tiempo de transporte que es calculado en el programa (Simio) tomando en cuenta la velocidad asignada a cada ambulancia acorde a la ley de tránsito vigente y las distancias consideradas en las restricciones de los escenarios propuestos en la sección 4 de la metodología. En la figura 28 se muestra una gráfica comparativa de los tiempos de transporte del escenario b y el escenario base.

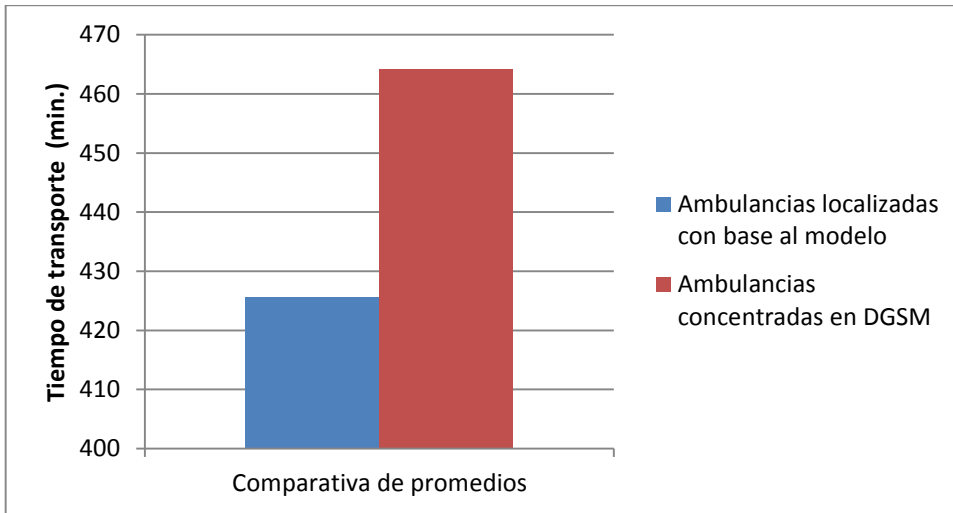


Figura 28. Promedio de tiempo de transporte

A través de la gráfica expuesta en la figura xxx se nota una disminución considerable en el tiempo de respuesta. En la figura 29 se muestra el comportamiento del modelo a lo largo de las diferentes corridas de simulación.

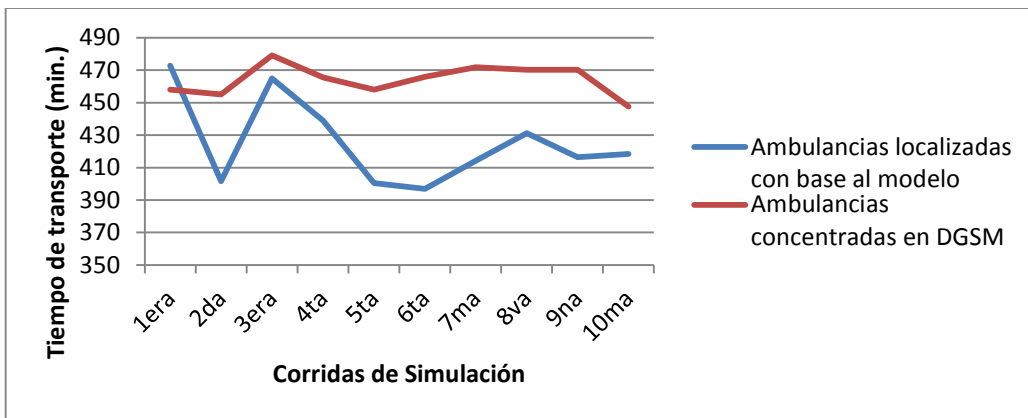


Figura 29. Comparativa entre escenarios a y b

### 3.3.2. Escenario c

Para facilitar el planteamiento de las restricciones del escenario c se sirve de la tabla 8.

Tabla 8. Distancias entre zonas para el escenario c

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>M</b>
<b>Zona</b>	<b>DGSM</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>DGSM</b>	<u>0</u>	1.2	1.5	0.7	1	<u>2.9</u>	1.7	1.6	0.9	0.8	<u>2</u>	0.9	1.2
<b>1</b>	<u>1.85</u>	<u>0</u>	0.5	1.6	1	<u>3.2</u>	<u>2.6</u>	<u>1.9</u>	0.8	1.2	<u>2.3</u>	1.1	1.5
<b>2</b>	1.39	1.4	<u>0</u>	1.1	<u>2</u>	<u>2.8</u>	1.6	1.4	<u>1.8</u>	0.7	<u>1.8</u>	0.7	1.1
<b>3</b>	0.27	1.4	<u>1.8</u>	<u>0</u>	1.1	<u>3.2</u>	<u>2</u>	<u>1.8</u>	1	1	<u>2.1</u>	1.2	1.5
<b>4</b>	<u>2.23</u>	0.4	0.9	<u>2</u>	<u>0</u>	<u>3.6</u>	<u>2.4</u>	<u>2.3</u>	0.6	1.5	<u>2.6</u>	1.5	<u>1.9</u>
<b>5</b>	<u>2.82</u>	<u>3.2</u>	<u>3.1</u>	<u>2.9</u>	<u>3.7</u>	<u>0</u>	<u>1.8</u>	<u>2.1</u>	<u>3.2</u>	<u>2.4</u>	<u>2.1</u>	<u>2.4</u>	<u>2.9</u>
<b>6</b>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>1.7</u>	<u>2.1</u>	<u>2</u>	<u>0</u>	0.3	<u>2.1</u>	1.3	0.7	0.7	1.1
<b>7</b>	1.43	<u>2.3</u>	<u>2.7</u>	<u>1.8</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	1	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	0.4	1.4	<u>1.8</u>
<b>8</b>	<u>2.67</u>	1.2	1.3	<u>2.4</u>	<u>1.7</u>	<u>4</u>	<u>2.8</u>	<u>2.7</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>3.1</u>	<u>1.9</u>	<u>2.4</u>
<b>9</b>	0.75	<u>1.9</u>	<u>2.3</u>	0.5	1.5	<u>2.5</u>	1.1	1	1.4	<u>0</u>	1.4	0.4	0.6
<b>10</b>	1	<u>1.9</u>	<u>2.3</u>	1.5	1.5	<u>2</u>	1.1	1.4	1.4	<u>1.9</u>	<u>0</u>	<u>1.7</u>	<u>2</u>
<b>11</b>	1.3	<u>2.4</u>	<u>2.9</u>	1.1	<u>2.1</u>	<u>2.1</u>	1.4	1.3	<u>2</u>	0.6	1.7	<u>0</u>	0.9
<b>12</b>	<u>1.85</u>	<u>2.2</u>	<u>1.8</u>	1.5	<u>2.6</u>	<u>2.1</u>	0.6	0.4	<u>2.2</u>	1.1	0.8	0.5	<u>0</u>

Cabe resaltar que a medida que limita la restricción de la distancia de cobertura se aumentan los nodos involucrados en las restricciones. Debido a que la función objetivo del modelo de localización no ha cambiado, solo se modifica el resto del modelo, es decir de la ecuación 2 a la 14, resultando en las siguientes ecuaciones:

$$X_C + X_D + X_E + X_I + X_J + X_L + X_M \geq Z_B$$

$$X_B + X_D + X_G + X_H + X_J + X_L + X_M \geq Z_C$$

$$X_B + X_E + X_I + X_J + X_L + X_M \geq Z_D$$

$$X_B + X_C + X_I + X_J + X_L \geq Z_E$$

$$X_H + X_J + X_K + X_L + X_M \geq Z_G$$

$$X_G + X_K + X_L \geq Z_H$$

$$X_B + X_C \geq Z_I$$

$$X_D + X_E + X_G + X_H + X_I + X_K + X_L + X_M \geq Z_J$$

$$X_D + X_E + X_G + X_H + X_I \geq Z_K$$

$$X_D + X_G + X_H + X_J + X_K + X_M \geq Z_L$$

$$X_D + X_G + X_H + X_J + X_K + X_L \geq Z_M$$

Para resolver el escenario c se vuelve a recurrir a Lindo que ofrece la figura 30 que es la pantalla de solución al modelo.

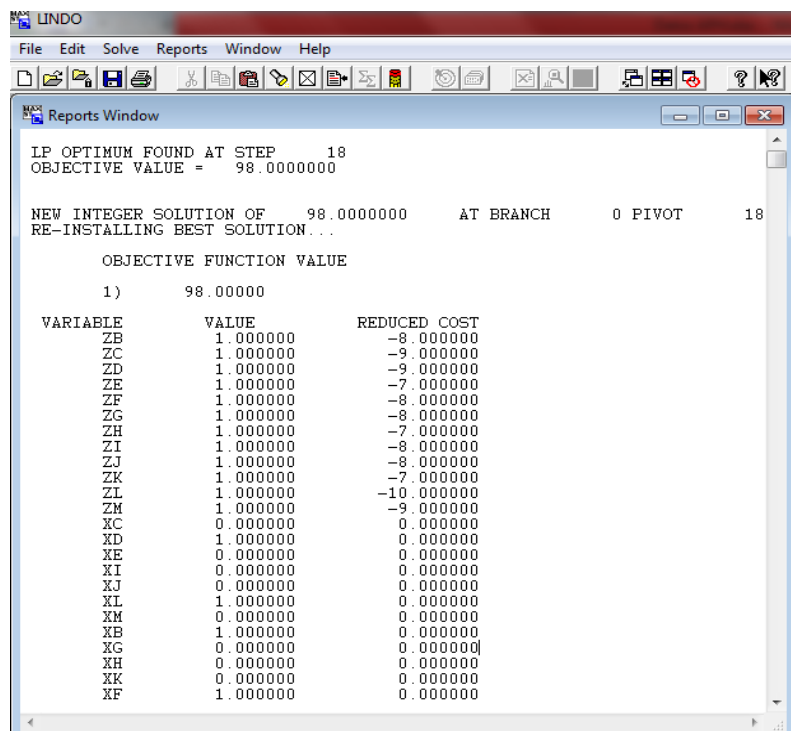


Figura 30. Pantalla de Lindo con el resultado del escenario c



Como se puede notar en la nueva solución se satisface una demanda máxima de 98 eventos, ubicando cada ambulancia en los siguientes nodos: XD, XL, XB y XF, interpretándose como en la tabla 9.

Tabla 9. Zonas resultado del escenario c

NODO	ZONA	ESCUELA
D	3	Ingeniería, Cele y Arquitectura
L	11	Veterinaria y Zootecnia
B	1	Derecho y Economía
F	5	Ciencias Políticas

Este comportamiento figura 31 muestra una disminución del tiempo de transporte (tiempo de respuesta) a medida que se emplea un modelo distinto, se observa que el modelo "c" ofrece una mejor solución que el modelo "b", podemos suponer que para los siguientes modelos, que ofrecen alternativas en la estrategia a seguir en la localización de ambulancias, seguiremos con una tendencia a la disminución del tiempo.

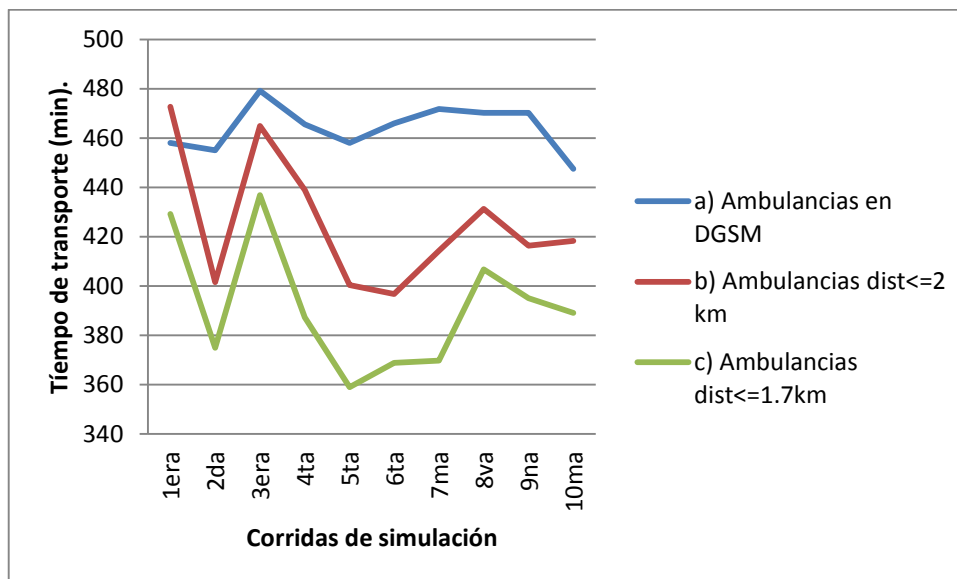


Figura 31. Comparativa entre escenarios a, b y c

### 3.3.3. Escenario d

Al igual como se empleó una tabla para facilitar la escritura de restricciones en el modelo c se recurrirá a la siguiente tabla 10 para el modelo d.

Tabla 10. Distancias entre zonas para el escenario d

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>M</b>
<b>Zona</b>	<b>DGSM</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>DGSM</b>	<u>0</u>	1.2	1.5	0.7	1	<u>2.9</u>	<u>1.7</u>	<u>1.6</u>	0.9	0.8	<u>2</u>	0.9	1.2
<b>1</b>	<u>1.85</u>	<u>0</u>	0.5	1.6	1	<u>3.2</u>	<u>2.6</u>	<u>1.9</u>	0.8	1.2	<u>2.3</u>	1.1	<u>1.5</u>
<b>2</b>	1.39	1.4	<u>0</u>	1.1	<u>2</u>	<u>2.8</u>	<u>1.6</u>	1.4	<u>1.8</u>	0.7	<u>1.8</u>	0.7	1.1
<b>3</b>	0.27	1.4	<u>1.8</u>	<u>0</u>	1.1	<u>3.2</u>	<u>2</u>	<u>1.8</u>	1	1	<u>2.1</u>	1.2	1.5
<b>4</b>	<u>2.23</u>	0.4	0.9	<u>2</u>	<u>0</u>	<u>3.6</u>	<u>2.4</u>	<u>2.3</u>	0.6	<u>1.5</u>	<u>2.6</u>	1.5	<u>1.9</u>
<b>5</b>	<u>2.82</u>	<u>3.2</u>	<u>3.1</u>	<u>2.9</u>	<u>3.7</u>	<u>0</u>	<u>1.8</u>	<u>2.1</u>	<u>3.2</u>	<u>2.4</u>	<u>2.1</u>	<u>2.4</u>	<u>2.9</u>
<b>6</b>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>1.7</u>	<u>2.1</u>	<u>2</u>	<u>0</u>	0.3	<u>2.1</u>	1.3	0.7	0.7	1.1
<b>7</b>	1.43	<u>2.3</u>	<u>2.7</u>	<u>1.8</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	1	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	0.4	1.4	<u>1.8</u>
<b>8</b>	<u>2.67</u>	1.2	1.3	<u>2.4</u>	<u>1.7</u>	<u>4</u>	<u>2.8</u>	<u>2.7</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>3.1</u>	<u>1.9</u>	<u>2.4</u>
<b>9</b>	0.75	<u>1.9</u>	<u>2.3</u>	0.5	<u>1.5</u>	<u>2.5</u>	1.1	1	1.4	<u>0</u>	1.4	0.4	0.6
<b>10</b>	1	<u>1.9</u>	<u>2.3</u>	1.5	<u>1.5</u>	<u>2</u>	1.1	1.4	1.4	<u>1.9</u>	<u>0</u>	<u>1.7</u>	<u>2</u>
<b>11</b>	1.3	<u>2.4</u>	<u>2.9</u>	1.1	<u>2.1</u>	<u>2.1</u>	1.4	1.3	<u>2</u>	0.6	<u>1.7</u>	<u>0</u>	0.9
<b>12</b>	<u>1.85</u>	<u>2.2</u>	<u>1.8</u>	1.5	<u>2.6</u>	<u>2.1</u>	0.6	0.4	<u>2.2</u>	1.1	0.8	0.5	<u>0</u>

Sería ocioso enunciar nuevamente las diversas variaciones que se presentan, en razón a que las variaciones que estas presentan tienden a ser menores a tal grado que no es indispensable describirlas, sin embargo lo que se torna indispensable es mencionar los resultados que se arrojan por el escenario d como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Zonas resultado del escenario d

NODO	ZONA	ESCUELA
L	11	Veterinaria y Zootecnia
B	1	Derecho y Economía
H	7	Contaduría y Administración
F	5	Ciencias Políticas

Los resultados obtenidos mediante el análisis de la selección de la localización de las ambulancias, análisis realizado a través del modelo de simulación son los presentados en la siguiente figura 32.

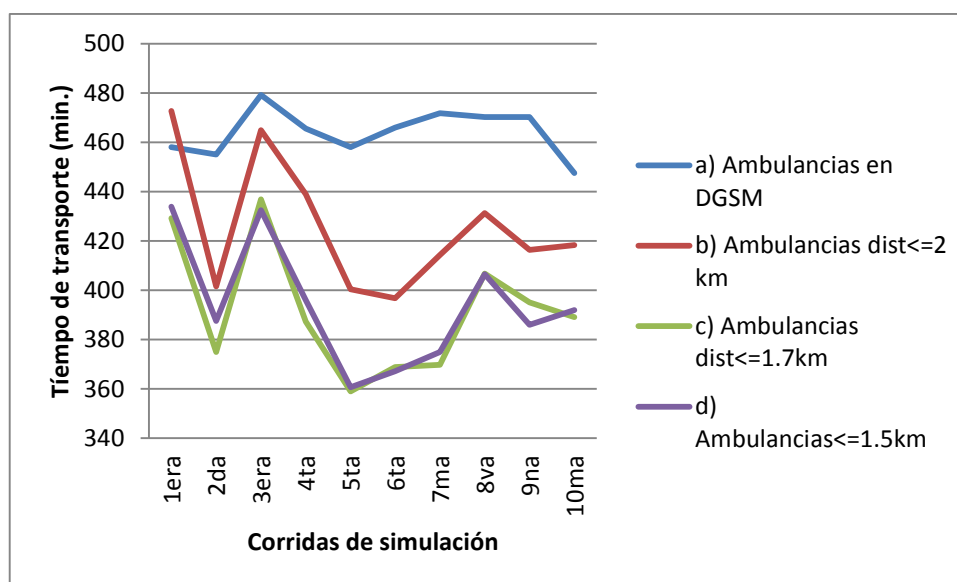


Figura 32. Comparativa entre escenario a, b, c y d

Se observa que el tiempo de transporte entre el modelo c y d no ha generado mayor variación pero sigue siendo menor que de los modelos a y b lo que demuestra que las estrategias de los modelos c y d son mejores.

### 3.3.4. Escenario e

Se presentan la tabla 12 en la cual se basa para el planteamiento de las restricciones del escenario e y la tabla xxx que es el resumen de la solución proporcionada por el escenario e.

Tabla 12. Distancias entre zonas para el escenario e

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Zona	DGSM	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DGSM	<u>0</u>	<u>1.2</u>	<u>1.5</u>	0.7	1	<u>2.9</u>	<u>1.7</u>	<u>1.6</u>	0.9	0.8	<u>2</u>	0.9	<u>1.2</u>
1	<u>1.85</u>	<u>0</u>	0.5	<u>1.6</u>	1	<u>3.2</u>	<u>2.6</u>	<u>1.9</u>	0.8	<u>1.2</u>	<u>2.3</u>	1.1	<u>1.5</u>
2	<u>1.39</u>	<u>1.4</u>	<u>0</u>	<u>1.1</u>	<u>2</u>	<u>2.8</u>	<u>1.6</u>	<u>1.4</u>	<u>1.8</u>	0.7	<u>1.8</u>	0.7	1.1
3	0.27	<u>1.4</u>	<u>1.8</u>	<u>0</u>	1.1	<u>3.2</u>	<u>2</u>	<u>1.8</u>	1	1	<u>2.1</u>	<u>1.2</u>	<u>1.5</u>
4	<u>2.23</u>	0.4	0.9	<u>2</u>	<u>0</u>	<u>3.6</u>	<u>2.4</u>	<u>2.3</u>	0.6	<u>1.5</u>	<u>2.6</u>	<u>1.5</u>	<u>1.9</u>
5	<u>2.82</u>	<u>3.2</u>	<u>3.1</u>	<u>2.9</u>	<u>3.7</u>	<u>0</u>	<u>1.8</u>	<u>2.1</u>	<u>3.2</u>	<u>2.4</u>	<u>2.1</u>	<u>2.4</u>	<u>2.9</u>
6	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>1.7</u>	<u>2.1</u>	<u>2</u>	<u>0</u>	0.3	<u>2.1</u>	<u>1.3</u>	0.7	0.7	1.1
7	<u>1.43</u>	<u>2.3</u>	<u>2.7</u>	<u>1.8</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	1	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	0.4	<u>1.4</u>	<u>1.8</u>
8	<u>2.67</u>	<u>1.2</u>	<u>1.3</u>	<u>2.4</u>	<u>1.7</u>	<u>4</u>	<u>2.8</u>	<u>2.7</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>3.1</u>	<u>1.9</u>	<u>2.4</u>
9	0.75	<u>1.9</u>	<u>2.3</u>	0.5	<u>1.5</u>	<u>2.5</u>	<u>1.1</u>	1	<u>1.4</u>	<u>0</u>	<u>1.4</u>	0.4	0.6
10	1	<u>1.9</u>	<u>2.3</u>	<u>1.5</u>	<u>1.5</u>	<u>2</u>	1.1	<u>1.4</u>	<u>1.4</u>	<u>1.9</u>	<u>0</u>	<u>1.7</u>	<u>2</u>
11	<u>1.3</u>	<u>2.4</u>	<u>2.9</u>	1.1	<u>2.1</u>	<u>2.1</u>	<u>1.4</u>	<u>1.3</u>	<u>2</u>	0.6	<u>1.7</u>	<u>0</u>	0.9
12	<u>1.85</u>	<u>2.2</u>	<u>1.8</u>	<u>1.5</u>	<u>2.6</u>	<u>2.1</u>	0.6	0.4	<u>2.2</u>	1.1	0.8	0.5	<u>0</u>

Tabla 13. Zonas resultado del escenario e

NODO	ZONA	ESCUELA
I	8	Psicología
M	12	Anexo de Ingeniería
G	6	Ciencias
F	5	Ciencias Políticas

En la figura 33 se muestra la comparativa del comportamiento de los diferentes escenarios a lo largo de las corridas de simulación, donde se observa que los tiempos de transporte calculados para el modelo e son notablemente mayores que los proporcionados por los modelos c y d pero menores que los valores de los modelos a y b, dando pie a que se piense que un decremento en el criterio para la definición de las restricciones a partir de distancias entre facultades menores a 1.5 km y tomando en cuenta la cantidad limitada de recursos con los que se cuenta (4 ambulancias) el tiempo de respuesta comienza a aumentar, esto debido a que cada ambulancia tiene un menor rango de operación, encontrando así el mejor rango de operación se encuentra entre los 1.7 km y los 1.5 km y al mismo tiempo encontrando la mejor estrategia en cuanto a localización de estos recursos.

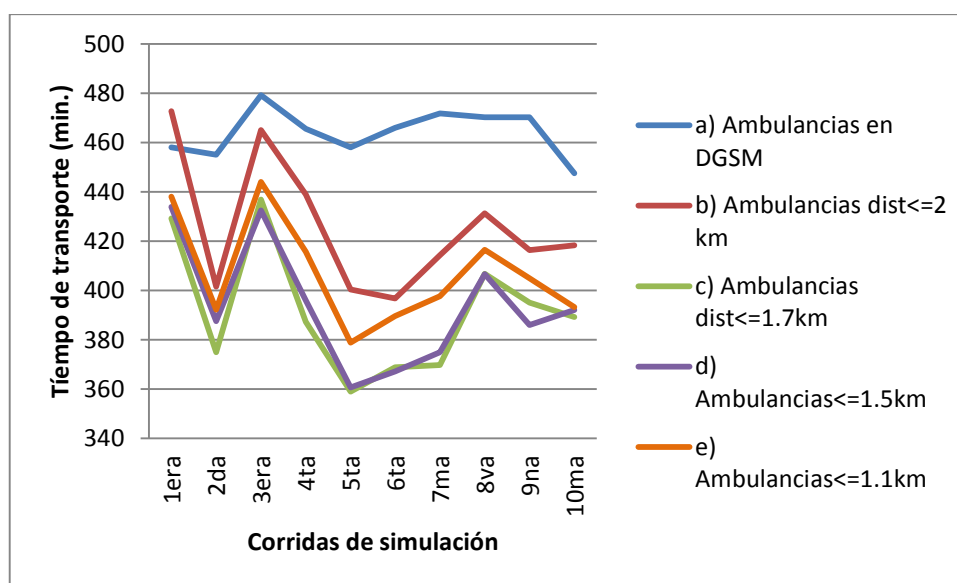


Figura 33. Comparativa entre escenarios a, b, c, d y e

La figura 34 muestra una línea de tendencia se sostiene el argumento que el mejor rango de criterio para un menor tiempo está ubicado en el rango  $1.5 \text{ km} \leq \text{distancia entre zonas} \leq 1.7 \text{ km}$ , donde las ambulancias tendrán un mejor desempeño, se puede referir a este punto como un mínimo local debido a:

Sea  $x^*$  un punto factible para el caso de general de un problema de optimización y  $N(x^*, \delta)$  un conjunto de puntos factibles que distan de  $x^*$  a lo sumo una distancia de  $\delta$ . Diremos que el punto  $x^*$  es un mínimo local si existe  $\delta > 0$  tal que (Pardines, 2007):

1.  $F(x)$  está definida en  $N(x^*, \delta)$ ; y
2.  $F(x^*) < F(y), \forall y \in N(x^*, \delta), y \neq x^*$

Otra manera de conocer que hemos alcanzado un mínimo es mediante la comparación de las pendientes aledañas al punto que se está evaluando, si la pendiente que está a la izquierda es negativa y la que está a la derecha es positiva se puede decir que efectivamente se ha llegado a un mínimo, de otra manera ( $m_i < 0$ ) y ( $m_d > 0$ ) claro que es solo una aproximación.

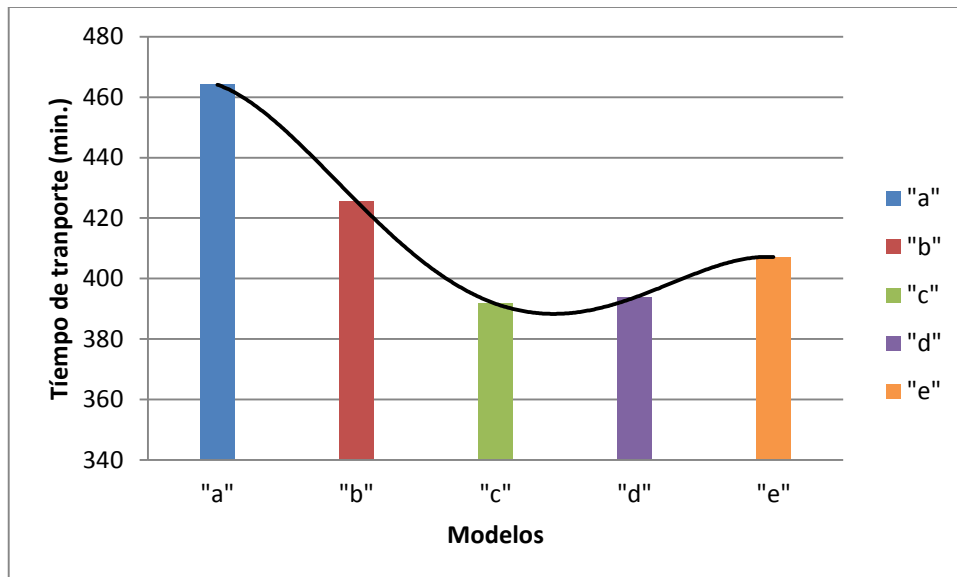


Figura 34. Tiempo de transporte por escenario

#### 4. Conclusiones

La figura 35 muestra la mejor estrategia para localizar las ambulancias dentro de Ciudad Universitaria con base al MCLM y la experimentación a través de simulación de los diferentes escenarios.

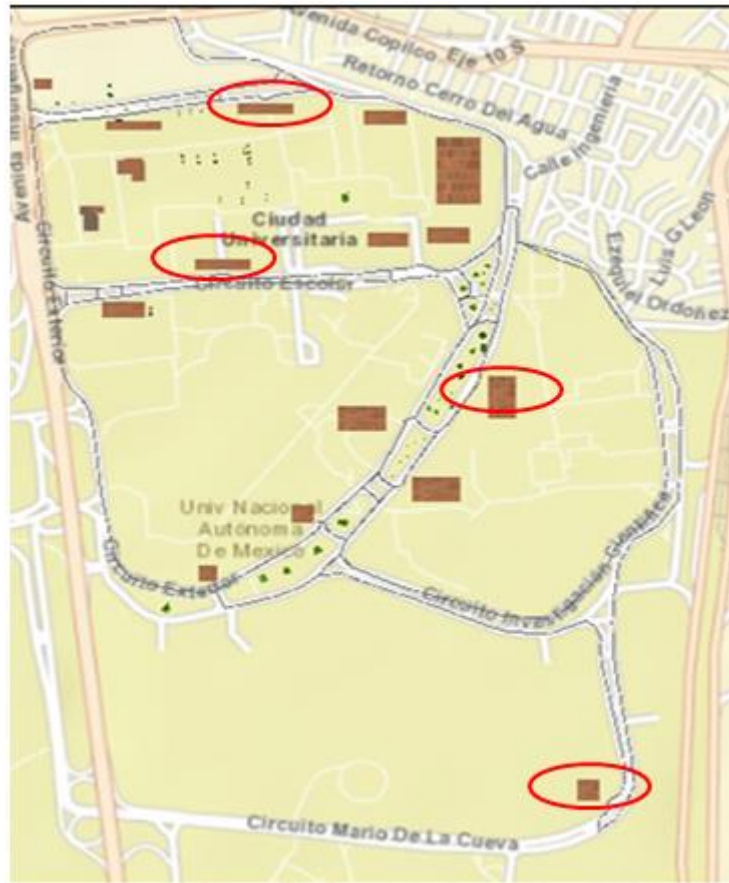


Figura 35. Zonas resultado del mejor escenario

Donde las zonas que están marcadas por una elipse son aquellas que maximizan la demanda cubierta y al mismo tiempo reducen el tiempo de respuesta en un 16% aproximadamente.

Después de haber experimentado es notable como el uso de dos técnicas de la investigación de operaciones puede mejorar el análisis que se puede hacer de un sistema hasta alcanzar mejores resultados, como lo fue la reducción de tiempo de respuesta en el traslado de las ambulancias; de no haber sido por la

simulación y solo con el modelo de localización efectivamente se hubiera llegado a una solución que minimiza el tiempo, pero no era la mejor solución. Esta fue encontrada con base a la facilidad de experimentación que nos brinda la simulación

Los servicios de ambulancia en Ciudad Universitaria de la ciudad de México, tienen un alto nivel de aleatoriedad con la duración de las tareas que forman parte de la rutina del sistema, además, muchas de las asignaciones no tienen reglas claras y dependen de las personas que están realizando la tarea. Sin embargo, la simulación de eventos discretos es una herramienta útil para un análisis de estos sistemas y otros sistemas, y es posible desarrollar modelos que son capaces de representar satisfactoriamente todos los fenómenos que forman parte de todas las actividades del sistema. Estos modelos hacen posible el análisis de escenarios con una fiabilidad estadísticamente aceptable, evaluando escenarios con una demanda incrementada y otros para reducir el tiempo de respuesta, por lo tanto el uso combinado de técnicas de optimización como lo es la localización y simulación mejora la búsqueda de valores óptimos para el sistema, la simulación permite un gran número de alternativas.

Este trabajo solo se enfocó a una pequeña parte de todo el sistema pre hospitalario, pero como se mencionó con anterioridad en México y el mundo cada día se requiere que estos sistemas sean más eficientes, desde el punto de vista operativo, pasando por la capacitación de personal hasta llegar a nuevas técnicas y procedimientos que permitan mejores oportunidades de disminuir el índice de mortalidad.

Como parte de los trabajos futuros, es importante tomar en cuenta que el trabajo se aplicó en ciudad universitaria uno de los pasos más claros sería aplicar a una ciudad más grande, incluso se puede empezar por delegaciones o municipios, claro que esto conlleva nuevos retos con respecto a la abstracción del modelo de simulación y su complejidad; Pero si nos enfocamos en ciudad universitaria y a manera de ampliación del modelo que ya se tiene, aumentar las zonas que se están estudiando, por ejemplo las zonas deportivas,



el espacio escultórico, el jardín botánico, el estadio, y las demás zonas que se encuentran en el campus más emblemático de la máxima casa de estudios, en cuanto al modelo de localización sería prudente considerar los costos que se tienen por mover cada ambulancia y agregar estos costos a la función objetivo, incluso se podría considerar otro modelo de localización, el camino aún tiene muchas veredas que descubrir, senderos que recorrer y caminos que hay que ampliar.

## 5. Bibliografía

“Introducción a Simio”, 2010, Simio, USA 2010 disponible en: [www.simio.biz](http://www.simio.biz)

Ayuso Baptista Fernando, 2011, "Manejo inicial del paciente traumatizado grave". Ed. Aragón, España

Bosch Robert, 2005, "Integer Programming", Springer, USA, 2005

Chakravati, Laha, and Roy. 1967. "Handbook of Methods of Applied Statistics, Volume I", John Wiley and Sons, pp. 392-94.

Church R. L., ReVelle C. 1974. "The maximal covering location problem". Papers in Regional Science, 32 (1), 101-118.

Cruz Vega Felipe, 2004, "Los accidentados y desastres, problemas de salud pública" Cirugía y Cirujanos.

Daskin S. Mark. "Network and Discrete Location". Models, Algorithms, and Applications". Ed. Wiley, 1995

Flores de la Mota, Idalia y Mayra Elizondo Cortés, 2006, "Apuntes de Simulación". México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.

Fraga - Sastrías Juan Manuel, 2010, "Sistemas médicos de emergencia en México, una perspectiva pre hospitalaria" Archivos de Medicina de urgencia en México.

García Alvaro y Ortega Miguel, 2006, "Introducción a la simulación de sistemas discretos", disponible en: [http://www.iol.etsii.upm.es/arch/intro\\_simulacion.pdf](http://www.iol.etsii.upm.es/arch/intro_simulacion.pdf)

Hakimi Louis, 1964, "Optimum location of switching centers and the absolute center and median of a graph", Operations Research, USA 1964

Hernández Roberto, 2003, "Metodología de la investigación", McGraw Hill, México, 2003

López Luis, 2008, "Simulación de eventos discretos con SimEvents", Webinar disponible en: <http://www.mathworks.com/videos/discrete-event-and-hybrid-modeling-with-simevents-82003.html>

Marianov Vladimir, 2009, "Median Problems in Networks", disponible en: [http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=1428362](http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1428362)

Monge Margalli José, 2000, "Epidemiología del traumatismo" Trauma.

Montgomery. 2003, "Probabilidad y estadística aplicada a ingeniería", Wiley and sons, USA 2003

Pardines Lence, 2007, Inmaculada, "Técnicas paralelas aplicadas a optimización no lineal en sistemas de memoria distribuida", España

Reynaga Obregón José, 2012, "Prueba de Bondad de Ajuste", disponible en: [http://www.facmed.unam.mx/deptos/salud/censenanza/planunico/spii/antologia\\_2012/3.pdf](http://www.facmed.unam.mx/deptos/salud/censenanza/planunico/spii/antologia_2012/3.pdf)

Robustè Francesc, 2005, "Logística del Transporte. Volumen 10 de Temas de Transporte y Territorio". Ed. Universidad Politécnica de Catalunya,

Schmid Verena, 2012, " Solving the dynamic ambulance relocation and dispatching problem using approximate dynamic programming", European Journal of Operations Research.

Serpil Ates , 2011, "Determining optimum ambulance location for heart attacks cases using GIS", Esri International User Conference, July 11-15, San Diego, USA

Silva García Luis, 2006, "Fundamentos del transporte sanitario", Ed. MAD, S.L. España.

Snyder Lawrence, 2011, "Covering Problems, Foundation of Location Analysis" Springer, USA 2011

Stephens M. 1974. "EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons", Journal of the American Statistical Association

Taha Hamdy, 2004, "Investigación de Operaciones". Ed. Pearson Educación, México 2004 7ª. Edición.

Weng Mark, 1999, "Healthcare simulation, a case study at a local clinic", Proceedings of the 31st conference on Winter simulation, USA 1999

Zanjirani Fahaarini Reza, 2009, "Facility Location, Concepts, Models, Algorithms and Case Studies", Springer, USA 2009

## 6. Anexo

Datos de 4 años obtenidos de los formatos que se llevan diariamente por los TUM cada vez que se hace uso del servicio médico de urgencias en la UNAM, como se muestra en la tabla 14.

Tabla 14. Datos analizados

2008	1	2	3	4	5	6	7	Total	2010	1	2	3	4	5	6	7	Total
Arquitectura	4	3	2	3	2	0	0	14	Arquitectura	3	7	1	3	6	5	1	26
C. Políticas	0	4	1	3	4	0	1	13	C. Políticas	7	10	3	4	7	2	0	33
Cele	0	5	3	3	1	0	0	12	Cele	3	5	2	3	2	0	1	16
Ciencias	4	11	8	9	4	5	1	42	Ciencias	12	11	12	18	12	2	0	67
Contaduría	3	6	2	3	3	2	2	21	Contaduría	15	7	15	10	17	5	1	70
Derecho	5	8	3	6	5	1	2	30	Derecho	14	11	8	6	23	0	3	65
Economía	1	0	1	2	1	0	1	6	Economía	2	2	8	3	7	0	1	23
Filosofía	5	3	4	11	5	1	4	33	Filosofía	10	18	12	16	13	4	1	74
Ingeniería	4	3	5	4	10	1	2	29	Ingeniería	6	1	3	5	5	1	0	21
Medicina	5	3	4	4	6	4	2	28	Medicina	6	7	12	9	4	0	2	40
Odontología									Odontología								
a	8	5	6	3	2	3	0	27	a	5	5	7	7	7	1	1	33
Psicología	5	0	2	2	0	2	0	11	Psicología	2	2	7	6	7	0	1	25
Química	4	4	4	4	4	1	0	21	Química	1	8	6	10	11	1	1	38
T. Social	1	2	2	0	2	0	0	7	T. Social	1	2	5	3	2	0	0	13
Vet. Y Zoo.	0	3	1	1	1	1	2	9	Vet. Y Zoo.	5	8	7	4	6	0	1	31
						2	1										
Total	49	60	48	58	50	1	7		Anexo Ing.	4	5	10	2	8	1	0	30

2009	1	2	3	4	5	6	7	Total
Arquitectur								
a	4	2	4	3	1	0	2	16
C. Políticas	3	6	1	6	7	4	1	28
Cele	2	7	1	5	1	0	0	16
Ciencias	12	7	18	9	9	0	1	56
Contaduría	5	8	12	6	5	0	0	36
Derecho	4	12	12	10	11	4	1	54
Economía	6	4	2	5	4	1	0	22
Filosofía	9	6	5	8	10	4	0	42
Ingeniería	4	11	4	11	2	0	1	33
Medicina	7	8	5	8	10	1	2	41
Odontologí								
a	8	5	3	7	6	1	1	31
Psicología	2	3	4	5	3	0	0	17
Química	4	7	6	3	8	1	1	30
T. Social	1	2	2	5	4	0	1	15
Vet. Y Zoo.	1	2	7	3	1	2	0	16
Anexo Ing.	1	1	1	3	1	1	0	8
						1	1	
Total	73	91	87	97	83	9	1	

2011	1	2	3	4	5	6	7	Total
Arquitectur								
a	1	4	3	4	1	1	0	14
C. Políticas	6	3	3	6	9	4	1	32
Cele	3	0	4	0	0	1	0	8
Ciencias	7	14	24	13	14	2	0	74
Contaduría	6	8	5	18	9	2	0	48
Derecho	9	15	12	14	15	7	0	72
Economía	3	3	2	3	3	2	0	16
Filosofía	7	12	9	8	10	6	6	58
Ingeniería	3	4	5	3	4	0	0	19
Medicina	8	7	8	8	11	4	1	47
Odontologí								
a	5	4	4	5	5	1	1	25
Psicología	3	5	4	1	4	0	0	17
Química	9	4	8	12	9	1	0	43
T. Social	1	1	2	3	2	0	0	9
Vet. Y Zoo.	4	9	4	4	3	1	0	25
Anexo Ing.	6	5	7	7	1	1	0	27
Total	81	98	4	9	0	33	9	