



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SISTEMAS – TRANSPORTE

LOCALIZACIÓN DE SERVICIOS MÉDICOS DE EMERGENCIA EN ZONAS
URBANAS Y SUBURBANAS, CASO DE ESTUDIO: CUERNAVACA, MORELOS.

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

PRESENTA:
JORGE DANIEL GARCÍA PÉREZ

TUTOR
DR. RICARDO ACEVES GARCÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, CD. MX. ENERO 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M. en I. Zuñiga Barrera Sergio
Secretario: M. I. Rivera Colmenero José Antonio
Vocal: Dr. Aceves García Ricardo
1 er. Suplente: Dr. Del Moral Dávila Manuel
2 d o. Suplente: M. I. Reséndiz López Héctor Daniel

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Facultad de Ingeniería, Cd. Mx., México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Ricardo Aceves García

FIRMA

Agradecimientos.

A Dios por darme la oportunidad de lograr esta meta y por todo lo que me ha dado.

Agradecimiento especial a mi familia por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

A mi director de tesis el Dr. Ricardo Aceves García por brindarme su tiempo y dedicación para dirigir esta investigación.

A mis amigos del Posgrado de Ingeniería por acompañarme durante estos dos años.

Al maestro José Antonio Rivera Colmenero por siempre motivarme y ayudar a terminar este proyecto.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por las enseñanzas y experiencias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la realización de mis estudios de posgrado.

A la Dra. Martha Cecilia Hjar Medina y el Dr. Sergio Rodrigo Rosas Osuna por su ayuda y posibilitar datos que hicieron posible la realización de esta investigación.

ÍNDICE

Introducción.....	7
Capítulo 1. Panorama general de los accidentes de tránsito.....	8
1.1 ACCIDENTES DE TRÁNSITO A NIVEL MUNDIAL.	8
1.2 DEFINICIÓN DE ACCIDENTE Y TIPOS DE ACCIDENTES.....	11
1.2.1 <i>Definición.</i>	11
1.2.2 <i>Tipos de accidentes.</i>	11
1.3 MODELOS DE ATENCIÓN DE ACCIDENTES.	14
1.3.1 <i>Modelos de atención de accidentes Anglo-Americano y Franco- Alemán.</i>	14
1.4 TIEMPO DE RESPUESTA DE LOS SERVICIOS MÉDICOS DE EMERGENCIA (SME).	14
1.5 COSTOS DE LOS ACCIDENTES.	17
1.6 ACCIDENTES A NIVEL NACIONAL.....	20
1.7. INFORMACIÓN DE ACCIDENTES EN CUERNAVACA, MORELOS.	22
1.8. DEFINICIÓN DE ZONA URBANA Y SUBURBANA.	23
Capítulo 2. Teoría de Localización.	25
2.1 HISTORIA DEL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN.	25
2.2 EL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN.	26
2.2.1 <i>Clasificación de los problemas de localización.</i>	26
2.3 MODELOS DE LOCALIZACIÓN.....	28
2.3.1. <i>Problema de máxima cobertura.</i>	29
2.3.2 <i>Problema de P-mediana.</i>	32
2.3.3 <i>Problema de optimización multi-objetivo.</i>	34
2.4 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).	37
2.4.1 <i>Componentes de un SIG.</i>	37
Capítulo 3. Caso de estudio.....	41
3.1 PROBLEMÁTICA.	41
3.2. METODOLOGÍA UTILIZADA.	42
3.2.1 <i>Área de estudio.</i>	43
3.2.2 <i>Obtención y análisis de los datos de accidentes en Cuernavaca.</i>	45
3.2.3 <i>Representación espacial de los accidentes.</i>	47
3.2.4 <i>Matrices de distancia y tiempo.</i>	50
3.2.5 <i>Formulación del modelo matemático.</i>	52
3.2.6 <i>Codificación del modelo utilizando GAMS.</i>	54
Capítulo 4. Interpretación de resultados.	56
Capítulo 5. Conclusiones.....	71
Referencias.	73

Índice de tablas

TABLA 1. PRINCIPALES CAUSAS DE MUERTE EN EL MUNDO.	9
TABLA 2. CLASIFICACIÓN DE LOS ACCIDENTES DE ACUERDO CON SU NATURALEZA.	12
TABLA 3. CLASIFICACIÓN DE LAS MUERTES POR TRAUMA INMEDIATO, TEMPRANO Y TARDÍO.	16
TABLA 4. MANERAS DE DETERMINAR LOS COSTOS.	20
TABLA 5. PRINCIPALES CAUSAS DE MORTALIDAD SEGÚN ORDEN DE IMPORTANCIA 2014.....	21
TABLA 6. PRINCIPALES CAUSAS DE MUERTE POR RANGO DE EDAD 2014.	22
TABLA 7. TOTAL DE ACCIDENTES DE TRÁNSITO EN ZONAS URBANAS Y SUBURBANAS.....	23
TABLA 8 CLASIFICACIÓN DE LOS PROBLEMAS DE LOCALIZACIÓN.	27
TABLA 9. ABREVIATURAS Y ENFOQUES DE SOLUCIÓN UTILIZADOS PARA PROBLEMAS MOP.....	36
TABLA 10. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UN SIG.	39
TABLA 11. ELEMENTOS INVOLUCRADOS EN LA SINIESTRALIDAD VIAL Y SUS PORCENTAJES DE INFLUENCIA.....	42
TABLA 12. NÚMERO DE ACCIDENTES POR TIPO DE ZONA EN CUERNAVACA.	45
TABLA 13. MATRIZ DE DISTANCIAS MÍNIMAS (KM) ENTRE NODOS.	50
TABLA 14. MATRIZ DE TIEMPOS (MIN) ENTRE NODOS.	51
TABLA 15. RESULTADOS.	56

Índice de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1. PIRÁMIDE DE HEINRICH	11
ILUSTRACIÓN 2 . RETRASOS EN EL TIEMPO DE RESPUESTA DE LOS SERVICIOS MÉDICOS DE EMERGENCIA.	15
ILUSTRACIÓN 3. ICEBERG DE COSTOS	18
ILUSTRACIÓN 4. COSTOS DE LOS ACCIDENTES VIALES.....	19
ILUSTRACIÓN 5. PARTES QUE COMPONEN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	38
ILUSTRACIÓN 6. LOCALIDADES E INFRAESTRUCTURA DE CUERNAVACA.	44
ILUSTRACIÓN 7. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS ACCIDENTES EN MORELOS.	47
ILUSTRACIÓN 8. DISTRIBUCIÓN DE ACCIDENTES Y VIALIDADES DE CUERNAVACA.....	48
ILUSTRACIÓN 9. HERRAMIENTA SHORTEST PATH PARA DISTANCIAS MÍNIMAS ENTRE ACCIDENTES.	49
ILUSTRACIÓN 10. HERRAMIENTA MATRIX COST PARA MATRIZ DE DISTANCIAS ENTRE ACCIDENTES.	49
ILUSTRACIÓN 11. CODIFICACIÓN DEL MODELO BI-OBJETIVO.	55
ILUSTRACIÓN 12. SIMBOLOGÍA UTILIZADA PARA REPRESENTAR LOS RESULTADOS.	56
ILUSTRACIÓN 13. UN SERVICIO MÉDICO CON TIEMPO DE RESPUESTA DE 2 MINUTOS.	57
ILUSTRACIÓN 14. DOS SERVICIOS MÉDICOS CON TIEMPO DE RESPUESTA DE 2 MINUTOS.....	58
ILUSTRACIÓN 15. TRES SERVICIOS MÉDICOS CON TIEMPO DE RESPUESTA DE 2 MINUTOS.	59
ILUSTRACIÓN 16. CUATRO SERVICIOS MÉDICOS CON TIEMPO DE RESPUESTA DE 2 MINUTOS.....	60
ILUSTRACIÓN 17. UN SERVICIO MÉDICO CON TIEMPO DE RESPUESTA DE 4 MINUTOS.	61
ILUSTRACIÓN 18. DOS SERVICIOS MÉDICOS CON TIEMPO DE RESPUESTA DE 4 MINUTOS.....	62
ILUSTRACIÓN 19. TRES SERVICIOS MÉDICOS CON TIEMPO DE RESPUESTA DE 4 MINUTOS.	63
ILUSTRACIÓN 20. CUATRO SERVICIOS MÉDICOS CON TIEMPO DE RESPUESTA DE 4 MINUTOS.....	64

ILUSTRACIÓN 21. UN SERVICIO MÉDICO CON TIEMPO DE RESPUESTA DE 5 MINUTOS.	65
ILUSTRACIÓN 22. DOS SERVICIOS MÉDICOS CON TIEMPO DE RESPUESTA DE 5 MINUTOS.	66
ILUSTRACIÓN 23. TRES SERVICIOS MÉDICOS CON TIEMPO DE RESPUESTA DE 5 MINUTOS.	67

Índice de gráficas

GRÁFICA 1. MUERTES POR ACCIDENTES DE TRÁNSITO EN FUNCIÓN DEL TIPO DE USUARIO (2013).	10
GRÁFICA 2. ACCIDENTES POR TIPO DE ZONA.	46
GRÁFICA 3. TIPOS DE ACCIDENTES DE LA BASE DE DATOS RAVMex.	46
GRÁFICA 4. DISTRIBUCIÓN DE ACCIDENTES POR INTERVALOS DE TIEMPO EN UN MES.	68
GRÁFICA 5. DISTRIBUCIÓN DE ACCIDENTES POR INTERVALOS DE TIEMPO EN UN DÍA.	69
GRÁFICA 6. TIPOS DE ACCIDENTES REGISTRADOS EN CUERNAVACA.	70
GRÁFICA 7. TIPOS DE ACCIDENTES QUE PRECISAN DE AMBULANCIA.	70

Introducción.

No es nada nuevo mencionar que las empresas y organizaciones tanto públicas como privadas se ocupan por tomar decisiones correctas sobre donde localizar instalaciones, almacenes, hospitales, escuelas, depósitos de reciclaje, estaciones de policía y/o bomberos, bancos, etc. Y el objetivo de tener una localización geográfica adecuada no solo es estratégica, también conlleva en algún sentido la minimización de costos, estos costos pueden ser unidades monetarias, tiempo, distancia, demanda cubierta o alguna otra unidad de medida.

Hay modelos de investigación de operaciones como la programación lineal, la programación dinámica, la teoría de decisiones, teoría de juegos, teoría de inventarios, la simulación y otros modelos que tienen un numeroso campo de aplicaciones. Dentro de esta variedad se encuentra la llamada teoría de localización de servicios, la cual es muy utilizada para dar solución a aquellos problemas de localización que al mismo tiempo tengan que cubrir una cierta demanda y determinar su capacidad.

La localización de servicios en los sistemas de emergencia, es muy importante ya que contribuye para dar una respuesta de manera rápida y eficiente ante un evento inesperado, como es un accidente; también para brindar la atención adecuada a los heridos por causa de accidentes automovilísticos. Existen estudios donde se menciona la importancia de una respuesta rápida de las unidades de emergencia para que el tiempo sea mínimo y la probabilidad de vida de los heridos sea mayor, algunos estudios refieren que cuando se atiende un accidente de tránsito después de 25 o 30 minutos la probabilidad de vida de los heridos es casi nula, por eso la importancia de una óptima localización.

Por lo que el objetivo general de este trabajo es determinar la localización óptima para los servicios médicos de emergencia (ambulancias), el área de cobertura máxima con un tiempo mínimo de respuesta al accidente, utilizando un modelo de localización bi-objetivo que permitan atender con el mínimo número de instalaciones, la mayor cantidad de accidentes posibles en la zona urbana y suburbana de la capital del Estado de Morelos, Cuernavaca.

En el desarrollo de este trabajo se hace uso de modelos matemáticos, específicamente de los modelos p-mediana y cobertura máxima, para crear así un modelo bi-objetivo que ayude a proponer una ubicación óptima de las unidades de emergencia, en el caso particular de las zonas urbanas y suburbanas del municipio de Cuernavaca, Morelos. También se hace uso de los sistemas de información geográfica ("ArcMap," 2010) y ("TransCAD," 2002) para representar la ubicación geográfica de los accidentes y analizar aspectos tales como: rutas más cortas, distancias, vialidades, etc., así mismo, para la resolución del modelo se utiliza el programa ("GAMS," 2016).

Capítulo 1. Panorama general de los accidentes de tránsito.

1.1 Accidentes de tránsito a nivel mundial.

De acuerdo a la (OMS, 2016) los accidentes de tránsito son una de las causas de muerte más importantes en el mundo, y la principal causa de muerte entre personas de edades comprendidas entre los 15 y los 29 años, cada año mueren cerca de 1.25 millones de personas en las carreteras del mundo. Los traumatismos causados por los accidentes de tránsito representan el 48% de las defunciones entre los adultos con edades comprendidas entre los 15 y los 44 años.

Los accidentes de tránsito siguen representando un importante problema de salud pública pese a los avances logrados en seguridad vial. Para reducir el número de accidentes de tránsito, habrá que acelerar el ritmo de los cambios legislativos y las medidas de aplicación, así como, prestar una mayor atención a los usuarios más vulnerables de la vía pública, como son: peatones, ciclistas y motociclistas.

En la década pasada, las causas principales de mortalidad eran la cardiopatía isquémica, los accidentes cerebrovasculares, las infecciones de las vías respiratorias y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (OMS, 2014). En la Tabla 1 se mencionan las 10 principales causas de muerte en el mundo en el año 2014.

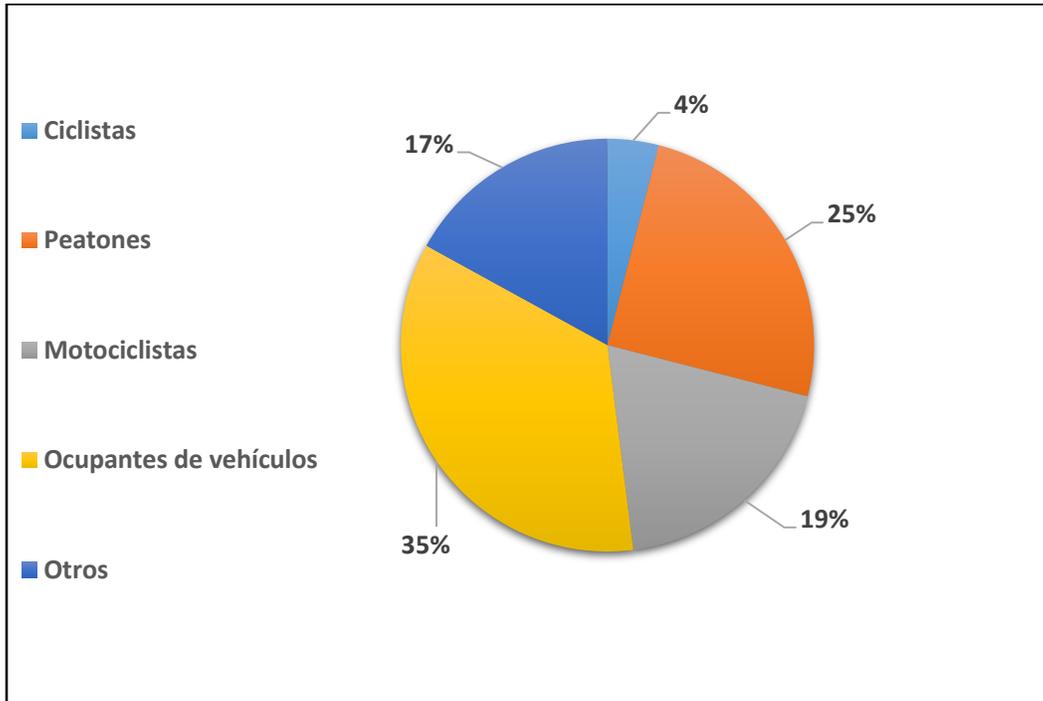
Tabla 1. Principales causas de muerte en el Mundo.

Número	Causa	No. de Muertes (millones)
1	Cardiopatía isquémica	7.4
2	Accidentes cerebrovasculares	6.7
3	Enfermedad pulmonar obstructiva	3.1
4	Infecciones respiratorias inferiores	3.1
5	Cánceres de tráquea, bronquios y pulmón	1.6
6	VIH/SIDA	1.5
7	Enfermedades diarreicas	1.5
8	Diabetes Mellitus	1.5
9	Accidentes de tránsito	1.3
10	Cardiopatía hipertensiva	1.1

Fuente: Las 10 causas principales de defunción en el mundo (OMS, 2014).

El 50% de todas las muertes que acontecen en las carreteras del mundo se produce entre los usuarios menos protegidos de las vías de tránsito: motociclistas 23%, peatones 22% y ciclistas 4%. Ahora bien, la probabilidad de que un motociclista, un ciclista o un peatón pierda la vida en la carretera varía en función de la región: así, con un 43%, la Región de África registra el mayor porcentaje de muertes de peatones y ciclistas del total de defunciones por accidentes de tránsito (OMS, 2015). Sin embargo, el tipo de usuario que tiene la mayor probabilidad de morir a nivel mundial es el ocupante de vehículo, seguido por los peatones, véase la gráfica 1.

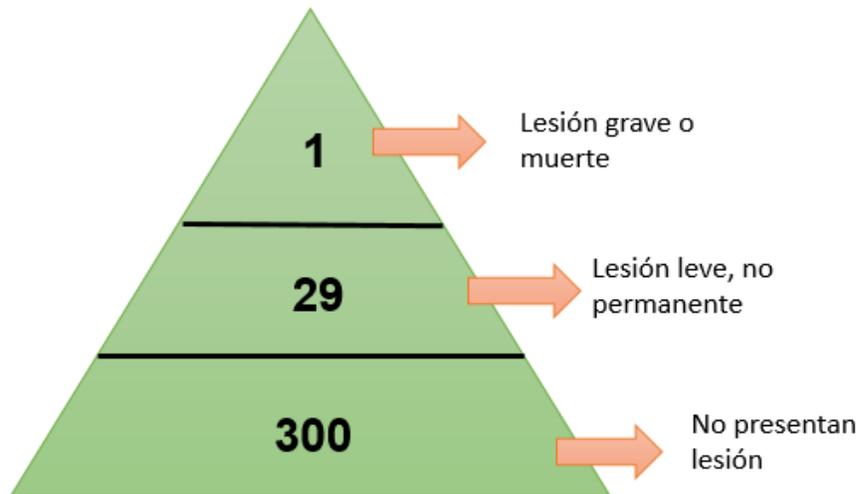
Gráfica 1. Muertes por accidentes de tránsito en función del tipo de usuario (2013).



Fuente: Elaboración propia en base a Informe Sobre la Situación Mundial de la Seguridad Vial (OMS, 2015).

En (1931) Herbert William Heinrich propuso y desarrolló una teoría sobre la causalidad de los accidentes en su libro "Prevención de Accidentes de Trabajo: un enfoque científico", dijo que el 88 % de los accidentes son causados por actos inseguros de las personas, el 10% se deben a condiciones peligrosas y el otro 2% a hechos fortuitos. Además propone lo que se conoce como la pirámide de Heinrich: de un grupo de 330 accidentes, 300 no dará lugar a lesiones, 29 se traducirá lesiones leves y 1 dará lugar a una lesión grave o la muerte (Johnson, 2011). Esta idea se representa en la ilustración 1.

Ilustración 1. Pirámide de Heinrich



Fuente: Elaboración propia en base a (Johnson, 2011).

1.2 Definición de accidente y tipos de accidentes.

1.2.1 Definición.

En el diccionario de la Real Academia Española se define accidente como un suceso eventual que altera el orden regular de las cosas o acción que resulta en daño involuntario para las personas o las cosas (Real Academia Española, 2016).

Basándonos en la definición anterior y como lo menciona Radelat (2003) en su libro “Principios de Ingeniería de Tránsito”, podemos dar la siguiente definición de acuerdo al desarrollo de este trabajo:

Llamamos accidente a un suceso eventual o acción en que involuntariamente resulta en daño para las personas o las cosas. Cuando uno de los factores que contribuyen a producir un accidente en la circulación de al menos un vehículo por vía, entonces se dice que el accidente es de tránsito.

1.2.2 Tipos de accidentes.

De acuerdo con los daños, Radelat (2003) menciona que los accidentes de tránsito se pueden clasificar, según los daños que causan en:

- 1) Accidentes mortales, cuando ocasionan el fallecimiento de alguna persona.
- 2) Accidentes con heridos, cuando se atropella a alguien sin causar muertes
- 3) Accidentes con daños materiales, si sólo se producen esos daños.

De acuerdo a su naturaleza los accidentes pueden clasificarse de manera general según las características del mismo, como lo menciona Baeza (2015) y se resumen en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Clasificación de los accidentes de acuerdo con su naturaleza.

Característica del accidente	Descripción
Atropellamiento	En este tipo de accidente, un peatón o un animal, es alcanzado o investido por un vehículo en movimiento con cualquier parte de su estructura. Entiéndase por peatón al usuario que se desplaza a pie en la vía pública.
Caída	Este tipo de accidente ocurre cuando uno o varias personas que viajan en un vehículo caen del mismo. Puede ser también interna al caer dentro del mismo vehículo.
Vuelco o volcadura	Hecho que ocurre cuando un vehículo que se encuentra en movimiento pierde el control y sus llantas dejan de hacer contacto con la superficie en la que se desplaza y hace contacto ya sea con el costado (vuelco lateral), sobre el techo (vuelco de campana) o el vehículo gira dando vueltas sobre cualquier parte del vehículo.
Derrape	Accidente en donde un vehículo gira sobre su centro de masa o bien derrapa lateralmente, normalmente sucede cuando existen elementos extraños en la carretera como agua, aceite, tierra, etc.

Colisión o choque	<p>Es el accidente entre dos o más vehículos en movimiento en el mismo sentido o en sentidos opuestos.</p> <p>Existen diferentes tipos de colisión como son:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Colisión trasera o por alcance: es la colisión entre dos vehículos en movimiento en el mismo sentido b. Colisión frontal: es la colisión entre dos vehículos en movimiento en sentidos opuestos c. Colisión en cadena o carambola: Es la colisión de tres o más vehículos, uno detrás de otro. Puede ser por colisión trasera o puede incluir colisiones frontales d. Colisión lateral: es el accidente entre vehículos en movimiento por carriles distintos, pero en el mismo sentido cuando uno de ellos inicia un desplazamiento a la izquierda o a la derecha e. Colisión transversal: involucra vehículos que van en direcciones con un Angulo de 90° u otro, generalmente en intersecciones, salidas de estacionamientos, etc.
Choque con un objeto fijo	<p>Accidente entre un vehículo en movimiento y un obstáculo sin movimiento; el obstáculo puede ser otro vehículo parado o un obstáculo fijo que normalmente están afuera de la vía, por ejemplo: árboles, postes de iluminación o señalización, cabinas telefónicas, entre otros.</p>
Combinación	<p>Donde puede haber accidentes que combinen dos o más de los tipos de accidente mencionados anteriormente</p>

Fuente: (Baeza, 2015)

1.3 Modelos de atención de accidentes.

La atención pre-hospitalaria en los accidentes de tránsito es de suma importancia, ya que es otorgada a la persona cuya condición clínica se considera que pone en peligro la vida, un órgano o su función, con el fin de lograr la limitación del daño y su estabilización orgánico funcional, desde el primer contacto hasta la llegada y entrega a un establecimiento para la atención médica con servicio de urgencias. En México el Secretariado Técnico del Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (STCONAPRA), con la participación de los Consejos Estatales para la Prevención de Accidentes y mediante la aplicación de la Norma Oficial Mexicana 034-SSA3-2013¹, promueven la implementación del modelo de atención pre-hospitalaria (STCONAPRA, 2016).

1.3.1 Modelos de atención de accidentes Anglo-Americano y Franco-Alemán.

De acuerdo a Arnold (1999) existen dos modelos principales para la prestación de atención de emergencia en el mundo actual: el modelo Anglo-Americano y el Franco-Alemán. Por un lado, en el modelo Anglo-Americano, los pacientes son llevados al hospital siendo los paramédicos (o técnicos en urgencias) los que se encargan de dar a las víctimas la primera atención. Mientras en el modelo Franco-Alemán los médicos y la tecnología son llevadas al lugar del accidente con la finalidad de proveer el nivel más alto de atención de emergencia antes de que las víctimas sean trasladadas a un hospital. La diferencia entre ambos modelos es que, mientras en el modelo Anglo-Americano los paramédicos son los que dan atención a las víctimas, en el Franco-Alemán son médicos (González, 2013).

Es importante el desarrollo de la medicina de emergencia, el reconocimiento de que la medicina de urgencias y específicamente los encargados de atender los siniestros debe de estar integrado por un grupo de personas con conocimientos profesionales especializados que les permita brindar una atención pre-hospitalaria a las víctimas para mantenerles con vida o en un “estado estable” antes de llegar al hospital para recibir los servicios correspondientes (Arnold, 1999). Este concepto de medicina de emergencia está ligado al tiempo de respuesta de las unidades de emergencia.

1.4 Tiempo de respuesta de los Servicios Médicos de Emergencia (SME).

Hay investigaciones que mencionan la importancia del tiempo de respuesta de los servicios médicos de emergencia. En los servicios médicos de emergencia (SME),

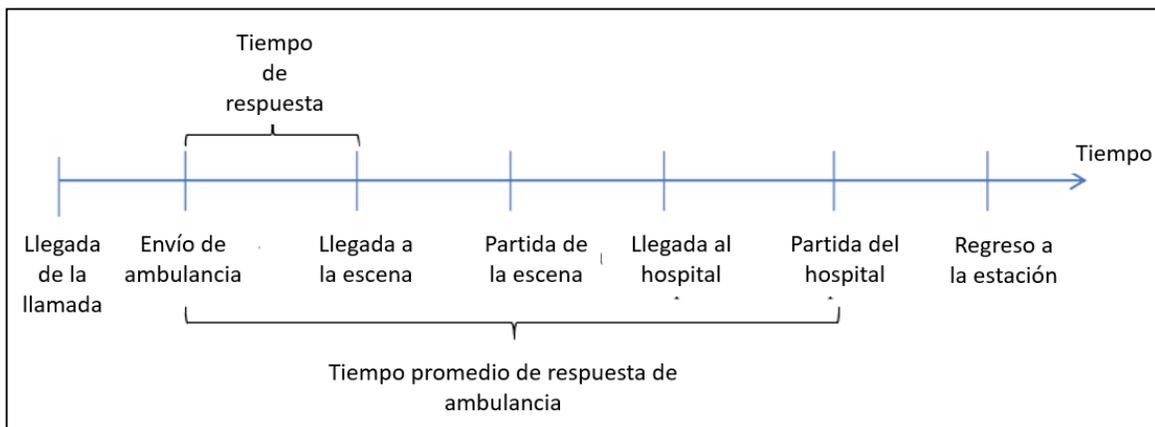
¹ Para más información véase <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/35899/NOM-034-SSA3-2013.pdf> y http://conapra.salud.gob.mx/Interior/Atencion_Prehospitalaria.html

el tiempo de respuesta es un factor crítico en la toma de decisiones sobre las configuraciones del sistema que afectan a la vida o la muerte. Si el SME no puede ofrecer un servicio rápido, la vida de las personas se pone en peligro (Li, Xueping; Zhao, Zhaoxia; Zhu, Xiaoyan; Wyatt, 2011). En un accidente de tránsito el tiempo de arribo de las ambulancias desde que reciben el aviso hasta que llegan al lugar del accidente debe de ser mínimo para la pronta atención de las víctimas.

Sánchez-Mangas et al. (2010) realiza una investigación en la cual muestra los resultados de la relación que existe entre, el tiempo de respuesta de las unidades de emergencia y la probabilidad de muerte. Una de sus conclusiones es que un tiempo de respuesta bajo disminuye la probabilidad de muerte, específicamente, una reducción de 25 a 15 minutos podría estar estadísticamente asociado con una disminución media significativa de esta probabilidad.

Lam et al. (2015) examinan los factores de riesgo subyacentes que pueden afectar los tiempos de respuesta de las ambulancias en incidentes, con el fin de derivar medidas que puedan mejorar el tiempo de respuesta. El tiempo de respuesta promedio para cada llamada de un incidente se define como el intervalo de tiempo desde el despacho de ambulancia hasta la entrega del paciente al hospital. Los diversos retrasos en la provisión del servicio médico de emergencia se desglosan en la ilustración 2.

Ilustración 2 . Retrasos en el tiempo de respuesta de los servicios médicos de emergencia.



Fuente: (Lam et al., 2015)

Ali, Miyoshi, & Ushijima, (2006) consideran al tiempo de respuesta, como un factor importante en la atención de víctimas de accidentes de tránsito. La calidad de la atención médica y el tratamiento de los pacientes son factores críticos que determinan por un lado el número de vidas que pueden ser salvadas y también la calidad de vida de los sobrevivientes.

Los que también consideran al tiempo de respuesta como un factor crítico son Felder & Brinkmann (2002). En la literatura hay gran variedad de investigaciones que toman como factor importante al tiempo de respuesta, entre las cuales podemos mencionar (Lam et al., 2015), (Trunkey, 1983), (An et al., 2015), (Picado & Agüero, 2016), etc.

Por otra parte Trunkey (1983) en su estudio describe una distribución trimodal de muertes por trauma en base al intervalo de tiempo desde la lesión hasta la muerte. Esta distribución tiene tres picos de mortalidad: el primer pico aparece dentro de los primeros segundos o minutos tras haber ocurrido el accidente, esta es una muerte casi inmediata causada por lesiones fatales, como trauma de tórax, laceraciones cerebrales, ruptura de aorta, etc. Aquí se producen alrededor del 50% de todas las muertes por traumatismo.

Este segundo momento de muerte ocurre, entre los primeros minutos y hasta 4 horas después de haber ocurrido el accidente. El 30% de accidentados se encuentra dentro de la segunda etapa, llamado de mortalidad temprana y el tercer pico de la distribución trimodal, corresponde al 15% de los casos, debido a falla orgánica múltiple (FOM), y va de 1 a 5 semanas (Rodríguez, 2012). Lo mencionado anteriormente puede ser resumido en la Tabla 3 siguiente.

Tabla 3. Clasificación de las muertes por trauma inmediato, temprano y tardío.

Muertes	Tiempo*	Ubicación	Causa	Intervenciones**
Inmediata	Minutos	Escena	No sobrevive a las lesiones	prevención de lesiones
Temprana	Horas	Hospital	Las lesiones graves, potencialmente capaces de sobrevivir con una atención óptima	Un mejor acceso a la atención del trauma
Tardía	Semanas	Hospital	Fallas de múltiples órganos, septicemia	Mejora de la reanimación y cuidados críticos
*Tiempos después de sufrir lesiones, ** intervenciones primarias con el mayor potencial para reducir las muertes por trauma				

Fuente: Elaboración propia en base a (Trunkey, 1983)

1.5 Costos de los accidentes.

Dentro de los varios impactos que puede generar un accidente, por mencionar algunos están el impacto social, psicológico, ambiental y económico. Hablando del impacto económico, se han realizado estudios para poder estimar mediante algún método el costo de un accidente.

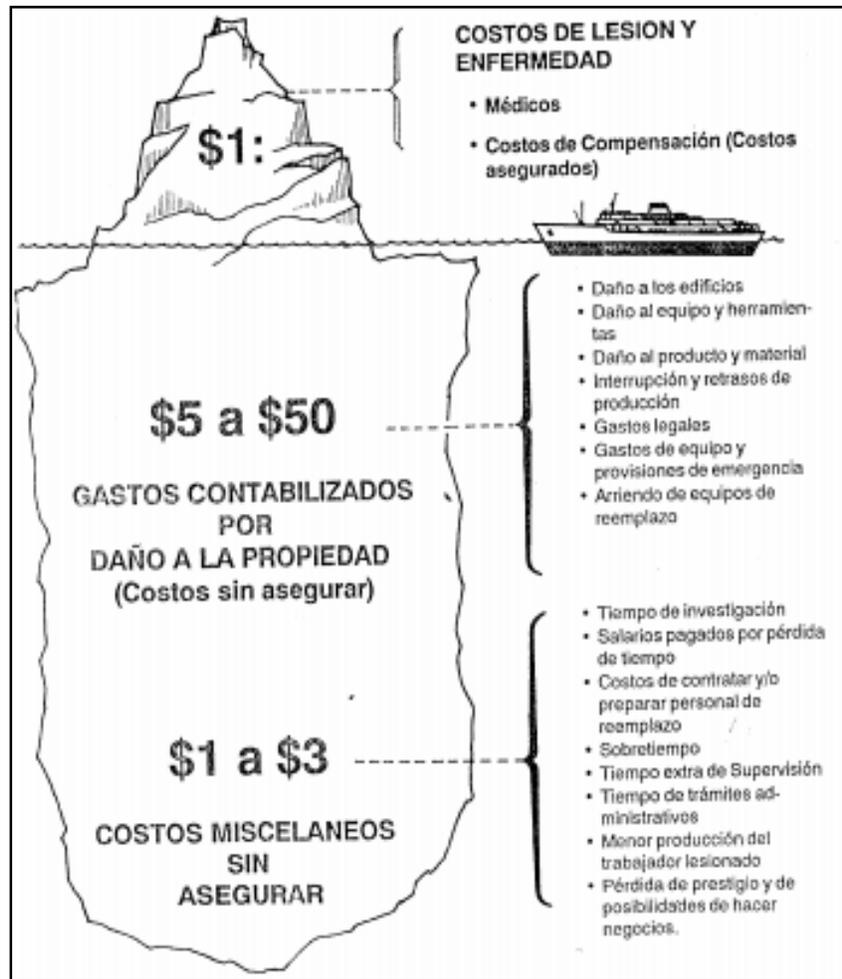
Los costos de los accidentes de tránsito no pueden determinarse exactamente, por la dificultad en obtener todos los datos necesarios y por la imposibilidad de evaluar correctamente valores inestimables tales como la vida humana. Sin embargo, la estimación del costo de los accidentes de tránsito es útil, porque: en primer lugar, permite a las autoridades demostrar cuantitativamente la importancia de las actividades destinadas a prevenir los accidentes y en segundo lugar establece una base económica para comparar accidentes entre sí (Radelat, 2003).

En México por ejemplo Pérez-Núñez et al. (2011) realizó un estudio sobre el impacto económico de los accidentes de tránsito fatales y no fatales en el área metropolitana de Guadalajara y Jalisco, mediante la estimación de los costos médicos directos e indirectos. En una muestra de 297 heridos, el 20% fueron hospitalizados y 237 sólo recibieron atención en urgencias. Se estimó un costo total de US \$ 21,190 en todos los heridos atendidos en la sala de emergencia y US\$83,309 para los hospitalizados. El costo directo representa más del 30% de los ingresos reportados en el 8% de los usuarios del servicio de emergencia y el 80% de los hospitalizados.

También uno de los métodos más conocidos para determinar el costo de un accidente es el llamado “iceberg de los costos”, desarrollado por (Bird & Germain, 1985) en su libro “Liderazgo práctico en el control de pérdidas”. Es así que, el costo que surge después de un accidente se les puede clasificar en dos tipos como lo menciona Rodríguez (2012): uno es el costo asegurado y otro es el costo oculto o sin asegurar. El costo asegurado incluye atención médica, hospitalización, rehabilitación, etc. Mientras que el costo oculto se divide en dos, gastos contabilizados por daño a la propiedad y costos misceláneos sin asegurar.

En el primer caso se tienen a los costos por daños a terceros, por ejemplo, daños a edificios, al equipo y herramientas, al producto y material, así como interrupción y retrasos de producción. El costo misceláneo sin asegurar, incluye tiempo de investigación, salarios pagados por pérdida de tiempo, costos de contratar y capacitar personal de remplazo, entre otros. Como se observa en la Ilustración 3, en esta se resume de forma clara los costos que normalmente vemos y los que se nos escapan cuando hablamos de accidentes.

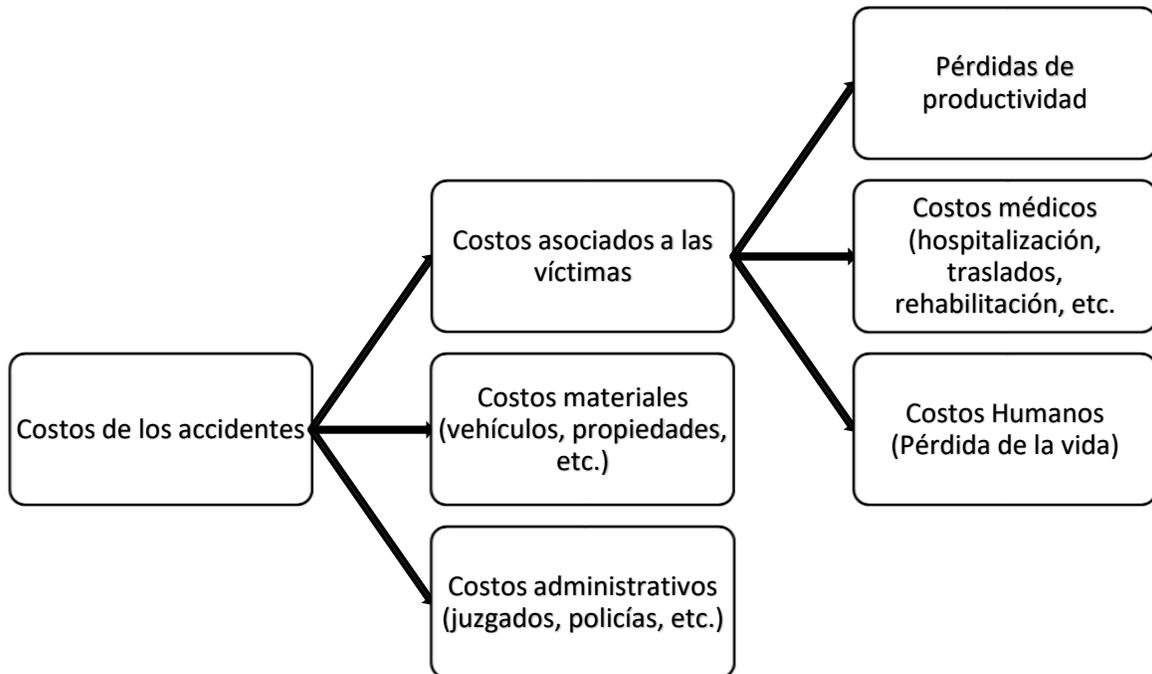
Ilustración 3. Iceberg de costos



Fuente: (Bird & Germain, 1985)

Por otro lado (Baeza, 2015) menciona que para el estudio y cálculo de los costos de asociados con los accidentes viales se debe considerar lo representado en la ilustración 4.

Ilustración 4. Costos de los accidentes viales.



Fuente: (Baeza, 2015)

Los *costos administrativos* incluyen el trabajo realizado por los policías, jueces, abogados, compañías de seguros, quienes gestionan administrativamente los accidentes. En comparación con los otros componentes estos costos son menores.

En los *costos materiales* se incluyen los de reparación o sustitución de los vehículos implicados en los accidentes, los costos de reparación de los daños ocasionados a las vías, señalamientos, elementos de alumbrados o mobiliario urbano dañado. En el caso de los accidentes sin víctimas, los costos materiales pueden ser los más relevantes, mientras que, en el caso de los accidentes con heridos graves o muertos, los costos materiales representan un porcentaje menor.

Los *costos asociados a las víctimas* son los más importantes. Entre estos costos se incluyen: i) los costos médicos asociados a la asistencia recibida en el lugar del hecho, en el hospital y en el proceso de recuperación; ii) los costos asociados a la pérdida de productividad por el periodo de baja laboral debido a las lesiones o en el caso del fallecimiento o de discapacidad la baja total; iii) los costos humanos los cuales son aquellos asociados al sufrimiento infligido por los accidentes viales en las víctimas, estos son los más difíciles de valorar.

Radelat (2003) menciona una investigación realizada por Hills & Jones-Lee (1983) en la que indican que hay distintas maneras de determinar los costos de los accidentes, los clasifican de 5 maneras estas se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Maneras de determinar los costos.

Costo	Descripción
Costos sociales brutos	Tales como los daños materiales, médicos y hospitalización, policías, tribunales de justicia, administración de seguros y el valor presente de la pérdida de salario de la víctima.
Costos sociales netos	Representan en el caso de muertes, la diferencia entre los costos sociales brutos y los del consumo material de la víctima desde la fecha de su fallecimiento hasta la fecha en que se espera terminaría normalmente su vida
Costos totales de las primas de seguro	Se toma como lo que le cuestan a la sociedad los accidentes de tránsito.
Indemnización	Que hacen pagar los tribunales de justicia a los que declaran responsables de los accidentes.
El método de la voluntad de pagar	Se basa en lo que la gente está dispuesta a pagar por la seguridad vial; lo que viene resultando el costo a la sociedad de los accidentes que se evitan.

Fuente: (Radelat, 2003) y (Hills & Jones-Lee, 1983)

1.6 Accidentes a nivel nacional.

Los accidentes de tránsito se encuentran dentro de las 5 primeras causas de muerte en México; según cifras oficiales, en 2013 fallecieron aproximadamente 36 mil personas a causa de algún tipo accidente. Aunque el riesgo de morir aumenta en las carreteras del país, por las altas velocidades que en ellas se alcanzan, la mayor parte de los accidentes se registran en las zonas urbanas y suburbanas que integran el sistema urbano nacional (Secretaría de Salud, 2015).

El INEGI (2014) presenta una lista de las principales causas de mortalidad en México, a continuación en la Tabla 5 se resumen las primeras diez según el orden de importancia.

Tabla 5. Principales causas de mortalidad según orden de importancia 2014.

Orden de importancia	Causas	Defunciones
1	Enfermedades del corazón	121,427
2	Diabetes mellitus	94,029
3	Tumores malignos	77,091
4	Accidentes de tráfico de vehículos de motor	35,815
5	Enfermedades del hígado	34,444
6	Enfermedades cerebrovasculares	33,166
7	Influenza y neumonía	20,550
8	Agresiones	20,010
9	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	19,715
10	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	13,089

Fuente: (INEGI, 2014) Dirección de Estadísticas Sociodemográficas, Estadísticas Vitales.

Sin embargo, las muertes causadas por accidentes de tránsito entre la población de 1 a 34 años de edad son la principal causa de defunciones a nivel nacional según datos del INEGI (2014). En la Tabla 6 se muestran las tres primeras causas de muerte por rango de edad.

Tabla 6. Principales causas de muerte por rango de edad 2014.

Orden de Importancia	Rango de edad			
	1-4 años	5-14 años	15-24 años	25-34 años
1	Accidentes de tráfico de vehículos de motor	Accidentes de tráfico de vehículos de motor	Accidentes de tráfico de vehículos de motor	Accidentes de tráfico de vehículos de motor
2	Malformaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas	Tumores malignos	Agresiones	Agresiones
3	Influenza y neumonía	Malformaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas	Lesiones autoinfligidas intencionalmente	Tumores malignos

Fuente: INEGI (2014) Dirección General de Estadísticas Sociodemográficas, Estadísticas Vitales.

1.7. Información de accidentes en Cuernavaca, Morelos.

Es de suma importancia señalar que el recuento de accidentes y víctimas (ya sean mortales o no) debe tratarse con mucha claridad y detalle, pues estos datos, además de dar un panorama del problema de seguridad en las vías, ayudan a detectar segmentos potencialmente peligrosos en un camino, así como también para evaluar medidas que pudieran haberse realizado (Pardillo Mayora, 2004).

A nivel nacional el Estado de Morelos ocupa el 15^o en cuanto a número de accidentes y de los 33 municipios que integran al estado de Morelos, Cuernavaca es el que presenta mayor número de accidentes con un total de 1,888 accidentes en el 2015 (INEGI, 2015), en la Tabla 7 se presentan los diez municipios donde ocurren una mayor cantidad de accidentes.

Tabla 7. Total de accidentes de tránsito en zonas urbanas y suburbanas.

No. Orden	Municipio	Año 2013			Año 2014			Año 2015		
		Zona ocurrió accidente			Zona ocurrió accidente			Zona ocurrió accidente		
		urbana	suburbana	Total	urbana	suburbana	Total	urbana	suburbana	Total
1	Cuernavaca	1617	0	1617	1718	0	1718	1840	48	1888
2	Jiutepec	1343	0	1343	1313	0	1313	1239	0	1239
3	Cuautla	959	4	963	1054	0	1054	1035	0	1035
4	Jojutla	445	200	645	458	196	654	387	224	611
5	Temixco	424	5	429	434	19	453	480	1	481
6	Emiliano Zapata	366	41	407	260	7	267	308	0	308
7	Yecapixtla	171	139	310	187	144	331	138	150	288
8	Xochitepec	246	52	298	159	93	252	157	114	271
9	Ayala	162	118	280	122	71	193	166	29	195
10	Yautepec	274	2	276	364		364	373	0	373

Fuente: Sistema estatal y municipal de base de datos (INEGI, 2015)

1.8. Definición de zona urbana y suburbana.

La definición de zona urbana puede cambiar dependiendo de un país a otro y, también puede variar a lo largo del tiempo dentro de un mismo país, lo que dificulta las comparaciones entre las distintas zonas o regiones.

Para la UNICEF (2012) una zona urbana se puede definir por medio de uno o más de los siguientes factores:

- Criterios administrativos o fronteras políticas (como formar parte de la jurisdicción de un municipio o comité de la ciudad).
- El tamaño de la población (cuando el número mínimo de habitantes en los asentamientos urbanos de la región es de 2,000, aunque puede oscilar entre 200 y 50,000).
- La densidad demográfica.
- La función económica (por ejemplo, cuando la actividad primordial de una gran mayoría de los habitantes no es la agricultura, o cuando existe empleo de sobra).
- La existencia de características urbanas (como calles pavimentadas, alumbrado público o alcantarillado).

De acuerdo a Gutiérrez de MacGregor (2003) en México se sigue el criterio de considerar a una población urbana cuando la localidad tiene más de 2,500 habitantes; cuando son menos de 2,500 se considera como rural, sin tomar en cuenta el criterio de que la población rural tiene, como ocupación principal, cultivar la tierra; la urbana se dedica esencialmente al comercio y a la industria. Varios autores coinciden en calificar de arbitrario el límite numérico de 2,500, para distinguir una población de otra. Entre ellos se encuentra Whetten (1948), quien dice que, para que en México una población sea considerada urbana, debe tener, por lo menos, 10,000 habitantes.

Para el desarrollo de este estudio se decidió utilizar la definición que da la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT,2012), definiendo a la zona urbana y suburbana como:

Una zona urbana, es el área habitada o urbanizada que partiendo de un núcleo central, presenta continuidad física en todas direcciones hasta ser interrumpida, en forma notoria, por terrenos de uso no urbano como bosques, sembradíos o cuerpos de agua. Se caracteriza por presentar asentamientos humanos concentrados de más de 15,000 habitantes. En estas áreas, se asienta la administración pública, el comercio organizado y la industria. Cuenta con infraestructura, equipamiento y servicios urbanos, tales como drenaje, energía eléctrica, red de agua potable, escuelas, hospitales, áreas verdes y de diversión, etcétera.

La zona suburbana, son aquellas zonas donde la población es de 2,500 a 14,999 habitantes, las viviendas se encuentran dispersas y en algunas ocasiones carecen de algunos servicios.

Capítulo 2. Teoría de Localización.

2.1 Historia del problema de localización.

Dado que las investigaciones y estudios realizados sobre la teoría de localización son muy extensos y que se ha estudiado durante un gran periodo de tiempo, será imposible resumirlos en un reducido número de páginas. Por lo tanto, cabe señalar que solo se harán mención de las teorías, autores y modelos más utilizados en las últimas décadas, aquellos que se encuentran comúnmente y que son importantes para el desarrollo de esta investigación.

La teoría de localización de servicios es una rama de la investigación de operaciones que estudia modelos para ubicar geográficamente el mejor lugar, de entre una serie de posibles candidatos, para la instalación de uno o más servicios (González, 2013). Los servicios pueden ser un hospital, una fábrica, un centro de distribución, una estación de bomberos o de policía, entre otros.

El problema de localización de servicios es muy antiguo, en la literatura matemática, Cavalieri en 1647 consideró el problema de determinar un punto, cuya suma de sus distancias a tres puntos dados, sea mínima (...) Fagnano en 1775 demostró, que el punto para el cual la suma de las distancias a los vértices de un cuadrilátero, es mínima, está dada por la intersección de las diagonales.

Tedenat en 1810 encontró para el caso de N puntos, la siguiente condición necesaria: la suma de los cosenos de los ángulos entre alguna línea arbitraria en el plano y el conjunto de líneas que unen los N puntos, con el punto mínimo, debe ser igual a cero. Finalmente Steiner probó en 1837, que la condición necesaria y suficiente, es que la suma de los cosenos y senos de los ángulos anteriormente mencionados debe ser igual a cero (Aceves, 1985).

Sin embargo, una de las primeras referencias sobre la teoría de localización moderna, es decir, como la herramienta matemática para resolver problemas de un tipo específico, fue introducida en 1909 por Alfred Weber, cuando consideró el problema de Fermat al Análisis de Localización en su tratado sobre la teoría de la localización industrial el problema consistía en determinar la localización óptima de una fábrica que debía minimizar la distancia total que se viajaría para atender a un conjunto de clientes espacialmente distribuidos, de ahí, el criterio considerado para tal localización era la minimización de los costos de transporte (distancia a recorrer), este fue el comienzo de los problemas de localización en un plano usualmente conocidos como problemas mediana o simplemente problemas de Weber (Rodríguez, 2012).

No fue sino hasta los trabajos de Kuhn en 1963, que el problema pudo ser considerado completamente tratado y resuelto. En la actualidad, al problema de localización se le ha vinculado fuertemente con las técnicas de optimización debido a los diferentes contextos en los que surge, pudiéndose utilizar en su análisis y solución, a la programación lineal, la programación dinámica, la programación no lineal y a la programación entera (Aceves, 1985).

2.2 El problema de localización.

La ubicación de instalaciones ha sido un área fundamental de la investigación por más de un siglo. Tiene un papel decisivo en el éxito de la cadena de suministro, aplicaciones que incluyen la localización de estaciones de servicio, escuelas, plantas, , hospitales, estaciones de policía, etc.(Fazel Zarandi, Davari, & Haddad Sisakht, 2011).

El problema de la localización de las instalaciones no es nuevo para la comunidad de investigación de operaciones; el reto para determinar cuál es el mejor sitio para las instalaciones, ha inspirado un rico, colorido y cada vez mayor bagaje en la literatura. Para hacer frente a la multitud de aplicaciones encontradas en el mundo de los negocios y en el sector público, ha surgido una familia cada vez más amplia de modelos (Klose & Drexl, 2005).

2.2.1 Clasificación de los problemas de localización.

En la literatura se pueden establecer diferentes maneras de clasificar a los problemas de localización, no obstante, para el objetivo y contenido de esta investigación se hace mención a los problemas de localización de servicios. Algunos ejemplos de trabajos donde se utilizan y clasifican este tipo de problemas son los de Farahani, Hekmatfar, Fahimnia, & Kazemzadeh (2014) en el cual determinan la ubicación de las instalaciones en una red multi-nivel, con el objetivo de servir de forma eficiente a los clientes de baja jerarquía (objetivo minimización del costo) y eficazmente (objetivo maximización de la disponibilidad del servicio).

También, Şahin, Süral, & Meral (2007) en su trabajo estudian y formulan varios problemas matemáticos para abordar los aspectos de ubicación y asignación de regionalización de los servicios de sangre en Turquía. Así mismo, Mandell (1998) en su trabajo considera un modelo de tipo cobertura para sistemas de emergencia de dos niveles.

A continuación, en la Tabla 8 se presenta una clasificación de los problemas de localización que sirven para el desarrollo de este trabajo.

Tabla 8 Clasificación de los problemas de localización.

Localización de centros de demanda	Puede ser considerada como estática o dinámica, tanto como, determinística o probabilística. Adicionalmente, dependiendo del tamaño del centro de demanda, puede ser considerada como localización de área.
Número de nuevos servicios	Pueden considerarse, un solo servicio o múltiples servicios. Además, puede ser variable de decisión o parámetro Y adicionalmente la localización de un solo servicio puede ser dependiente o independiente de los demás.
Medida de la distancia	Las más comúnmente usadas son: rectilínea, cuadrado de la euclidiana y euclidiana. Sin embargo, existen algunos problemas en donde, la medida de distancia no puede ser razonablemente representada por alguna de las medidas anteriores.
Espacio de soluciones	Generalmente puede ser de dos o tres dimensiones, además puede considerarse continuo o discreto, comúnmente, el espacio de solución discreto consta de un número finito de posibles ubicaciones, y el espacio de solución continuo se compone de un número infinito de éstas. También el espacio de soluciones puede estar limitado por una o más restricciones.
Función objetivo	Los objetivos comúnmente usados son minimizar alguna función de costo total o la minimización del máximo costo entre pares de fuentes de servicio y centros de demanda.
Demanda	Generalmente es cuantitativa, pero además puede ser una función de la localización. Su magnitud puede ser estática o dinámica, determinística o probabilística y ser variable de decisión o parámetro.

Fuente: (Aceves, 1985)

Componentes del problema de localización.

Aceves (1985) sugiere que es posible determinar los componentes fundamentales de un problema de localización de servicios, independientemente de los diferentes contextos en que se puede presentar. Para lo cual, se deben considerar los siguientes seis elementos principalmente:

Demanda: definida también como la interacción entre fuentes de servicio y centros de demanda o la interacción entre algún par de nuevos servicios.

Número de servicios: que representa la cantidad de nuevos servicios que se desean o necesitan localizar.

La medida de distancia: que representa una medida de recorrido entre los diferentes puntos o centros de demanda y fuentes de servicio, en la región o área de estudio.

Localización de los puntos o centros de demanda: nos indican los diferentes sitios o lugares en donde surgen o se tienen necesidades.

El espacio de soluciones: nos indica el número de posibles localizaciones de los nuevos servicios.

La función objetivo: que normalmente nos representa alguna función de costo total, para evaluar soluciones alternativas.

Estos seis elementos deberán estar presentes de una u otra forma, en todo problema de localización de servicios.

2.3 Modelos de localización.

Casi todas las empresas del sector privado y público que podemos pensar se han enfrentado con el problema de la localización de las instalaciones en un momento de su historia. Las empresas industriales deben determinar las ubicaciones de las fábricas y plantas de ensamble, así como almacenes. Los establecimientos comerciales la localización sus tiendas o puntos de venta. Las instituciones de gobierno deben localizar oficinas y otros servicios públicos como escuelas, hospitales, estaciones de bomberos, ambulancias, estaciones de inspección de vehículos y vertederos (Daskin, 1995).

En los últimos años el diseño de los Servicios Médicos de Emergencia (SME) ha atraído una considerable atención por la comunidad científica fomentando varias contribuciones. Proporcionar un nivel de servicio adecuado es una lucha para muchos sistemas de atención de la salud, pero es de especial interés en el contexto del Servicio Médico de Emergencia. Existen diferentes medidas de rendimiento que

pueden ser consideradas para evaluar el nivel de servicio como, por ejemplo, la población cubierta, la equidad y la accesibilidad del servicio, la puntualidad de las intervenciones y tiempo de respuesta (Beraldi & Bruni, 2008).

En la literatura encontramos una variedad de modelos para los problemas de SME y de localización de ambulancias. Se diferencian en algunas cuestiones importantes como, por ejemplo, la cobertura espacial y temporal, gestión de la congestión, la preparación para desastres, la maximización de la disponibilidad de vehículos, minimización de los costos, etc. Las recomendaciones típicas proporcionadas por los diferentes modelos son los números, ubicaciones, tipos y capacidades de las estaciones base del vehículo (M Gendreau, Laporte, & Semet, 2006).

Recientemente, los investigadores han propuesto modelos más realistas para la localización y planificación de las instalaciones de emergencia, por ejemplo, los modelos de colas, modelos dinámicos, modelos de cobertura gradual y los modelos de cobertura cooperativa. Tradicionalmente, los problemas de localización de instalaciones de emergencia suelen tomar decisiones a partir de dos aspectos: qué sitios deben seleccionarse como depósitos para las instalaciones y el número de instalaciones a colocar en los puntos de demanda, así como los sitios potenciales para las instalaciones (Li, Xueping; Zhao, Zhaoxia; Zhu, Xiaoyan; Wyatt, 2011).

Li et al. (2011) también mencionan que los problemas de localización de instalaciones de emergencia se pueden dividir en tres grandes grupos:

- 1) *Modelos de cobertura*, que hacen hincapié en proporcionar cobertura dentro de una distancia estándar predefinida.
- 2) *Modelos de p-mediana*, que minimizan la distancia total o promedio de servicio para todos los puntos de demanda;
- 3) *Modelos de p-centro*, cuyo objetivo es reducir al mínimo la distancia máxima de servicio para todos los puntos de demanda.

2.3.1. Problema de máxima cobertura.

Uno de los modelos más populares entre los modelos de localización de servicios es el problema de máxima cobertura. Mientras que los modelos de cobertura no son nuevos siempre han sido muy atractivos para la investigación, esto es debido a su aplicabilidad en el mundo real, especialmente para instalaciones de servicio y de emergencia. En algunos problemas de cobertura, un cliente debe ser servido por al menos una instalación dentro de una distancia crítica dada (no necesariamente el establecimiento más cercano). En la mayoría de los problemas de cobertura, los clientes reciben servicios por las instalaciones en función de la distancia entre el cliente y las instalaciones (Farahani, Asgari, Heidari, Hosseininia, & Goh, 2012).

Para Drezner & Drezner (2014) uno de los objetivos clásicos del modelo cobertura se basa en el concepto de que un punto de demanda está cubierto por una

instalación dentro de un radio determinado y no más allá de ese radio. Schilling et al. (1993) clasifica los modelos que utiliza por el concepto de cobertura en dos categorías: el problema de cobertura establecida (Set Covering Problem, SCP) cuando se requiere que la cobertura sea máxima y el problema de localización de cobertura máxima (Maximal Covering Location Problem, MCLP), en donde se busca optimizar la cobertura.

De acuerdo con la literatura, el modelo problema de cobertura de conjunto de ubicaciones (Location Set Covering Problem LSCP, por sus siglas en inglés), fue propuesto por Toregas, Swain, ReVelle, & Bergman (1971). El LSCP es un modelo de cobertura cuyo objetivo es encontrar el número mínimo de instalaciones para cubrir todos los puntos de demanda. Sin embargo, la cobertura total es difícil de lograr en la realidad debido a los recursos limitados. Para un punto lejos de la demanda, es probable que no pueda quedar incluido dentro del estándar de distancia predefinida (Li et al. ,2011).

Unos años más tarde, el primer modelo determinista de cobertura máxima fue propuesto por Church & ReVelle (1974), llamado Problema de Localización de Cobertura Máxima (Maximal Covering Location Problem, MCLP). Dado un número limitado de instalaciones, este modelo tiene como objetivo maximizar la cobertura de la demanda.

El modelo LSCP es probablemente el primer modelo de cobertura para la localización de instalaciones de emergencia (Li et al., 2011), los modelos de cobertura son bien conocidos y se formulan de la siguiente manera:

En donde:

i = índice de nodos de demanda

j = índice de las instalaciones

N_i = conjunto de posibles ubicaciones dentro de S tal que $N_i = \{j | d_{ij} \leq S\}$

x_j = variable de decisión binaria que indica si la instalación se sitúa en el punto j o no

d_{ij} = distancia entre el nodo de demanda i y la instalación j

S = distancia máxima aceptable de servicio

$$\text{Min } z = \sum_{j=1}^n x_j \quad (1)$$

Sujeta a:

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq 1 \quad , \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

En la formulación anterior, la función objetivo (1) minimiza el número total de instalaciones requeridas. La restricción (2) especifica que todos los puntos de la demanda deben estar cubiertos por al menos una instalación y la restricción (3) es de integralidad.

El problema de localización de cobertura máxima (MCLP) desarrollado por Church & Reville (1974) maximiza la cantidad de demanda cubierta dentro de una distancia de servicio aceptable mediante la localización de un número determinado de nuevas instalaciones (Farahani et al., 2012). El modelo MCLP se formula de la siguiente manera.

En donde:

i = índice de nodos de demanda

j = índice de las instalaciones

h_i = cantidad de demanda en el nodo i

S = el tiempo o distancia estándar a la que se desea ubicar la instalación

p = total de instalaciones requeridas para ser localizadas

a_{ij} = parámetro binario, es 1 si la distancia de un lugar candidato j

a la instalación existente (o cliente) i no es mayor que S .

x_j = variable binaria que indica si una instalación se ubica el j o no

z_i = variable de decisión binaria, es 1 si el nodo i está cubierto, de lo contrario 0

La formulación matemática es la siguiente:

$$Max = \sum_i^n h_i z_i \quad (4)$$

Sujeta a:

$$z_i \leq \sum_j a_{ij} x_j, \quad \forall i \quad (5)$$

$$\sum_j x_j \leq p \quad (6)$$

$$z_i \in \{0,1\} \quad \forall i \quad (7)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \quad (8)$$

En la formulación anterior la función objetivo (4) maximiza la cobertura de la demanda. La restricción (5) garantiza que el punto i se cubren sólo si una o más instalaciones se colocan dentro de la distancia estándar, la restricción (6) especifica el número total de instalaciones situadas o disponibles y las restricciones (7) y (8) son de integralidad.

Existe un cuantioso campo de los modelos de cobertura y estos también presentan variantes o cambios en sus formulaciones que los hacen específicos para su usanza, en la literatura encontramos numerosos artículos a los que hacemos referencia donde se puede explorar los diferentes modelos de cobertura y sus variantes. Podemos mencionar algunos como son: (Li, Xueping; Zhao, Zhaoxia; Zhu, Xiaoyan; Wyatt, 2011), (Farahani et al., 2012), (Farahani et al., 2014), (Daskin, 1995), (Karatas, Razi, & Tozan, 2016), (Klose & Drexl, 2005).

2.3.2 Problema de P-mediana.

En los modelos de localización en redes, la demanda, los viajes y la ubicación de los servicios, ocurren solamente en el contexto de una estructura compuesta de nodos y arcos. Con frecuencia se supone que la demanda ocurre solo en los nodos de la red y la localización de los servicios puede ser en nodos o arcos. Sin embargo, algunos modelos consideran que la demanda también puede ocurrir en los arcos de la red (Rodríguez, 2012).

Para resolver este tipo de problemas existe el problema de la p-mediana que entra en otra categoría de los modelos de localización en particular de los problemas de cobertura. Su objetivo es identificar las ubicaciones óptimas para un número determinado de p instalaciones que necesitan para suministrar a n puntos de demanda, con el fin de minimizar la distancia (o cualquier costo) de cada instalación y su punto de demanda (Baray & Cliquet, 2013). El costo de atender demanda en el nodo i está dado por el producto de la demanda en el nodo i y la distancia entre el nodo de demanda i y las instalaciones más cercanas al nodo i (Rodríguez, 2012).

El problema p-mediana puede formularse de la siguiente manera:

En donde:

h_i = cantidad de demanda en el nodo i

d_{ij} = distancia entre el nodo de demanda i y el sitio candidato j

p = número de instalaciones a localizar

x_j = variable binaria, es 1 si se ubica la mediana en el sitio candidato j

0 en otro caso

y_{ij} = variable binaria, es 1 si las demandas del nodo i son cubiertas

por las instalaciones en el nodo j , 0 en otro caso

$$\text{Min } \sum_i \sum_j h_i d_{ij} y_{ij} \quad (9)$$

Sujeto a:

$$\sum_j y_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (10)$$

$$\sum_j x_j = p \quad (11)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i, j \quad (12)$$

$$x_j = 0,1 \quad \forall j \quad (13)$$

$$y_{ij} = 0,1 \quad \forall i, j \quad (14)$$

La función objetivo (9) busca minimizar la distancia total ponderada entre las demandas y sus instalaciones más cercanas. Las restricciones (10) requieren que cada demanda del nodo i le sea asignada una instalación j . La restricción (11) establece que p instalaciones necesitan ser situadas. Las restricciones (12) vinculan las variables de ubicación (x_j) y las variables de asignación (y_{ij}). En donde establecen que las demandas del nodo i , sólo pueden ser asignadas a las instalaciones localizadas en j ($y_{ij} = 1$), si una de las instalaciones es localizada en el nodo j ($x_j = 1$). Las restricciones (13) y (14) son condiciones de integralidad (Rodríguez, 2012).

2.3.3 Problema de optimización multi-objetivo.

La optimización multi-objetivo (también llamado multi-criterio) se puede definir como el problema de encontrar un vector de variables de decisión que satisfaga ciertas limitaciones y optimiza una función vectorial cuyos elementos representan las funciones objetivo. Estas funciones forman una descripción matemática de un conjunto de criterios de rendimiento, que por lo general están en contradicción una de otra. Por lo tanto, el término "optimizar" significa encontrar una solución en la que los valores de todas las funciones objetivo sean aceptables para el tomador de decisiones (Osyczka, 1985).

La definición matemática de un problema multi-objetivo (Multi-Objective Problem, MOP por sus siglas en inglés) es importante para establecer las bases de entendimiento entre la naturaleza interdisciplinaria de derivar posibles técnicas de solución (determinista, estocástica); es decir, los algoritmos de búsqueda. Coello, Lamont, & Van Veldhuizen (2007) mencionan una formulación matemática y simbólica formal del MOP.

La formulación de problemas de un objetivo ayuda en cierta manera para reflejar la naturaleza de problemas multi-objetivo en los que no hay solo una función objetivo a optimizar, sino varias. Por lo tanto, no hay una solución única, sino un conjunto de soluciones. Este conjunto de soluciones se encuentran en base a la teoría de optimización de Pareto (Ehrgott, 2005). Tenga en cuenta que los problemas multi-objetivo requieren un tomador de decisiones para hacer una elección x_i de valores. La selección es esencialmente una solución de compromiso de una solución completa de x sobre otra en el espacio multi-objetivo.

Justamente, los problemas multi-objetivo (MOPS) son aquellos problemas donde el objetivo es optimizar k funciones objetivas simultáneamente. Esto puede implicar la maximización o minimización de todas las funciones de k , así como la una combinación de estas funciones. Podemos definir y formular un problema MOP (Min o Max) formalmente como lo hace (Coello et al., 2007):

$$\text{Min o Max } F(x) = (f_1(x), \dots, f_k(x)) \quad (15)$$

Sujeto a m restricciones de desigualdad:

$$g_i \leq 0, \quad i = \{1 \dots \dots m\}, \quad (16)$$

y a p restricciones de igualdad:

$$h_j = 0, \quad j = \{1 \dots \dots p\} \quad (17)$$

$$x \in \Omega$$

Donde en (15) k es el número de funciones objetivos, x el vector de variables de decisión $x = [x_1, x_2, \dots \dots, x_n]^T$. La restricción de desigualdad (16) y de igualdad (17). Lo que se desea es determinar desde dentro de un conjunto de F a todos los vectores que satisfagan las restricciones (16) y (17).

Existe un amplio campo de investigaciones para los enfoques de solución de problemas MOP, los métodos de solución pueden ser métodos exactos, heurísticas, programación entera o lineal, etc. Para conocer la variedad de enfoque de solución se presenta la Tabla 9 mencionando los métodos más comunes para resolver problemas MOP.

Tabla 9. Abreviaturas y enfoques de solución utilizados para problemas MOP.

Abreviatura	Enfoques
B&B	Branch&Bound
IP	Integer programming
MIP	Mixed integer programming
GP	Goal programming
MIGP	Mixed integer goal programming
EM	Exact method
CP	Compromise programming
H	Heuristics
SA	Simulated annealing
TS	Tabu search
GRASP	Greedy randomized adaptive search procedures
VNS	Variable neighborhood search
ILS	Iterated local search
GA	Genetic algorithm
EP	Evolutionary programming
ES	Evolutionary strategies
SS	Scatter search
PR	Path relinking
EDA	Estimation of distribution algorithms
DE	Differential evolution
MA	Memetic algorithms
ACO	Ant colony optimization
PSO	Particle swarm optimization

Fuente: (Yenisey & Yagmahan, 2014)

2.4 Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Los sistemas de información geográfica (SIG), son una herramienta para realizar diversos análisis mediante la creación y manipulación de modelos cartográficos; los objetivos de cualquier SIG son la representación gráfica de la ubicación espacial de un problema además es un sistema de recolección de datos para tener la información organizada y la modelación de las variables contenidas (Correa, 2015).

El INEGI (2014) define a un SIG como conjunto de herramientas diseñadas para obtener, almacenar, recuperar y desplegar datos espaciales del mundo real. Entiéndase por datos al conjunto de mapas, de la misma porción del territorio, donde un lugar concreto tiene la misma localización (las mismas coordenadas) en todos los mapas.

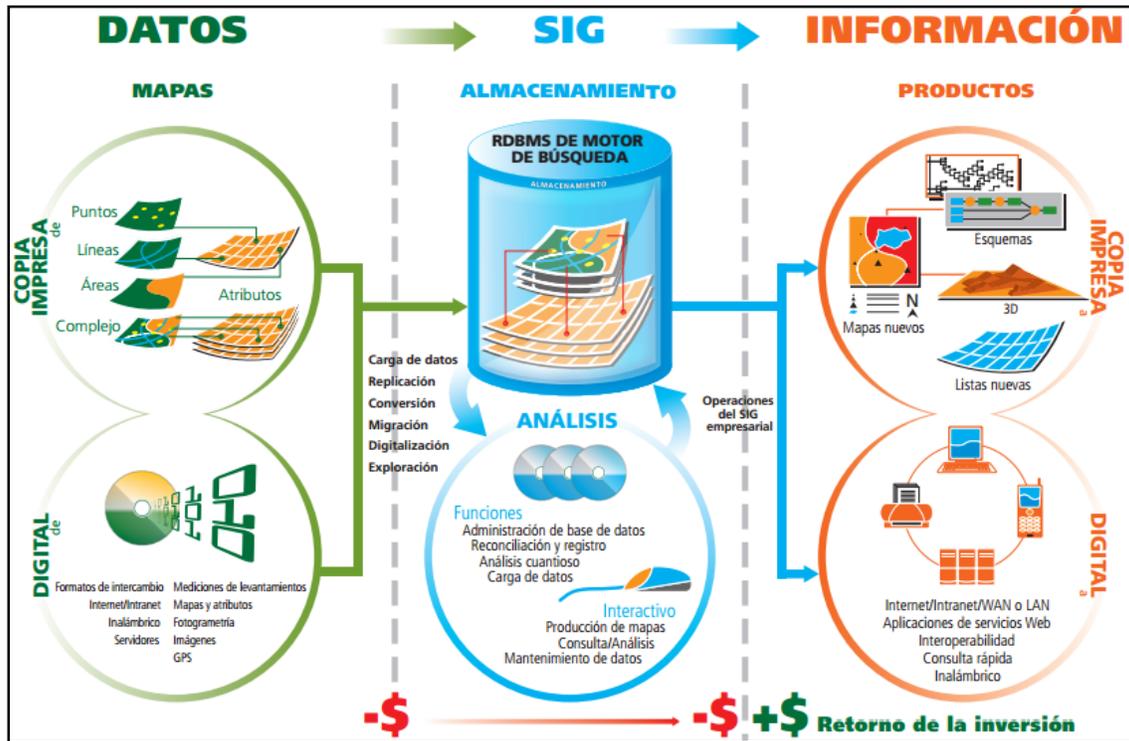
Auerbach (2015) menciona que los sistemas de información geográfica son dispositivos integrados donde se puede capturar, gestionar, manipular y presentar los datos geográficos. Esto implica una combinación de hardware, software y datos reunidos para analizar las condiciones, las tendencias y los acontecimientos en el entorno natural.

Esri (2016) menciona que un sistema de información geográfica (GIS por sus siglas en inglés) es un sistema para la gestión, que nos deja visualizar, analizar e interpretar los datos para entender las relaciones, patrones y tendencias, de los datos que estamos analizando.

2.4.1 Componentes de un SIG.

En la ilustración 1 se muestra un modelo holístico de un sistema de información geográfica, el cual convierte datos en información útil mediante un análisis. En el centro puede verse que el SIG almacena datos espaciales, llenos de la información de sus atributos vinculada lógicamente, en una base de datos de almacenamiento del SIG, donde las funciones analíticas están controladas de manera interactiva por un operario con el fin de generar los productos informativos necesarios (Tomlinson, 2013).

Ilustración 5. Partes que componen un sistema de información geográfica.



Fuente: (Tomlinson, 2013)

De igual manera Tomlinson (2013) en su libro “Thinking About GIS: The Whole Picture” señala que el SIG es un sistema complejo de partes interconectadas. Por lo tanto, se debe tener en cuenta seis diferentes componentes principales: los productos de información, los datos, el software, el hardware, los procedimientos y el recurso humano.

Productos de información: Los productos de información son lo que se quiere (se necesita) obtener del SIG. Este puede tomar la forma de mapas, informes, gráficos, listas o cualquier combinación de estos elementos.

Datos: También conocidos como datos geoespaciales o información geográfica, los datos geoespaciales se pueden identificar como información sobre las ubicaciones y formas de las características geográficas y límites en la tierra, como características naturales o construidas, océanos y más. Los datos espaciales suelen almacenarse como coordenadas y topología, y son datos que pueden ser mapeados, se distinguen por la presencia de un vínculo geográfico.

Software: Los programas de software proporcionan las funciones necesarias para realizar análisis y crear los productos informativos que se desean. A veces el software personalizado se utiliza conjuntamente con el paquete de software de SIG principal.

Hardware: El SIG es exigente en cuanto a hardware. En general, unas pocas computadoras potentes sustentan el trabajo y el geoprocetamiento, aunque en sistemas más grandes esto lo hacen cada vez más los servidores de SIG de una red. Las computadoras simples de la red proporcionan acceso al usuario con fines de consulta de base de datos y visualización. Una red interna robusta y un alto valor de ancho de banda de conexión a Internet son también necesarios para facilitar el uso compartido de archivos, la adquisición de datos y la creación de informes.

Procedimientos: Los procedimientos se refieren a la manera como las personas realizan sus trabajos, a las metodologías de adquisición, análisis de datos y representación de resultados y los cambios que tendrán que adoptar para trabajar con el nuevo sistema SIG.

Recurso humano: El SIG es un proceso inteligente que requiere de un recurso humano adecuado. Será necesario contar, capacitar y mantener al personal con los conocimientos especializados que se requieren para crear o usar su sistema.

En el estudio de caso que se analiza capítulos más adelante se hace uso de un SIG para ubicar geográficamente los accidentes, las vialidades principales y sus sentidos, etc. por ese motivo es importante identificar las ventajas y desventajas de usar un SIG, en la Tabla 10 se hace mención de algunas ventajas y desventajas del mismo.

Tabla 10. Ventajas y desventajas de un SIG.

Ventajas	Desventajas
Capacidad del almacenamiento. Múltiples niveles de datos.	Alto costos de adquisición y mantenimiento del sistema.
Los datos se almacenan y se presentan en forma separada. La presentación es múltiple.	Costos y problemas técnicos en la captura de datos (conversión analógica- digital) y en la transferencia (incompatibilidades).
Capacidad de manejo. Edición y actualización.	Costos de mantenimiento de datos. Administración, actualización y edición
Rapidez en la operación.	Necesidad de formación de cuadros especializados. Operación en el ámbito digital
Capacidad de establecer una relación coherente. Utilizar simultáneamente datos espaciales y sus atributos	Falsa sensación de exactitud.
Capacidad de análisis. Implementación de modelos de aplicación.	

Fuente: (INEGI, 2014)

Se ha hecho uso del SIG para la ubicación de unidades de emergencia con anterioridad, Luna & Chías (1999) realizan un estudio de la distribución de los accidentes mediante el uso de SIG. En el Distrito Federal realizó un diagnóstico espacial de los accidentes de tránsito (UNAM IIG ; Secretaria de Salud, 2009). También las publicaciones de Toran & Long (2012) y Mahmud & Indriasari (2009) que de igual manera se enfocan a la localización de los servicios de emergencia.

En la mayoría de los sectores los SIG pueden ser utilizados como una herramienta de ayuda a la gestión y toma de decisiones. A continuación, mencionaremos algunas de las aplicaciones donde pueden ser utilizados los SIG's:

- Catastro
- Planificación urbana
- Gestión de recursos naturales
- Gestión de servicios
- Rutas de transporte
- Cartografía
- Planificación comercial
- Evaluación de riesgos y emergencias
- Impacto ambiental
- Estudios sociológicos y demográficos

Capítulo 3. Caso de estudio.

3.1 Problemática.

El problema de siniestralidad vial de carreteras en áreas urbanas no es nuevo, su origen se remonta al momento mismo en que se crearon los primeros caminos para la comunicación entre ciudades. Se cree que los romanos fueron la primera civilización en construir caminos como tal y accidentes entre peatones, vehículos de tracción animal y otros elementos ocurrieron desde entonces. La accidentabilidad en los caminos ha tomado tales magnitudes que en el mes de octubre del año 2005 se instituyó el tercer domingo de cada mes de noviembre como el “Día Mundial de Recuento de Víctimas de Accidentes de Tránsito” (Mendoza, Gutiérrez, & Cadengo, 2013).

Esta problemática de siniestralidad ocurre por la combinación de varios factores, sin embargo, su principal causa es el hecho de que una persona que viaja de una ciudad a otra, sobre algún tipo de vehículo, tiene un objetivo muy claro: transportarse lo más rápidamente posible, por lo que desarrolla velocidades mucho más altas que las que se tienen dentro de una ciudad. Asimismo, el ambiente aledaño a un camino a campo abierto es muy diferente al que se tiene en una vialidad urbana y la transición de uno a otro crea conflicto en la mente humana (Mendoza et al., 2013).

La mezcla de usuarios de diversos tipos y comportamientos causa restricciones de la capacidad, retrasos y deterioro en el nivel de seguridad. Es por ello que cada vía debe destinarse a una función específica, adaptándola y diseñándola de tal modo que cumpla de forma eficiente y segura con la función asignada. Debe tener consistencia en sus elementos, cualquier factor que tome por sorpresa al usuario es un posible causante de accidentes. Los elementos de la carretera se conciben para garantizar la circulación de automóviles con características de conducción similares. En el ámbito urbano las condiciones que restringen el tránsito son más estrictas que las situadas fuera del poblado.

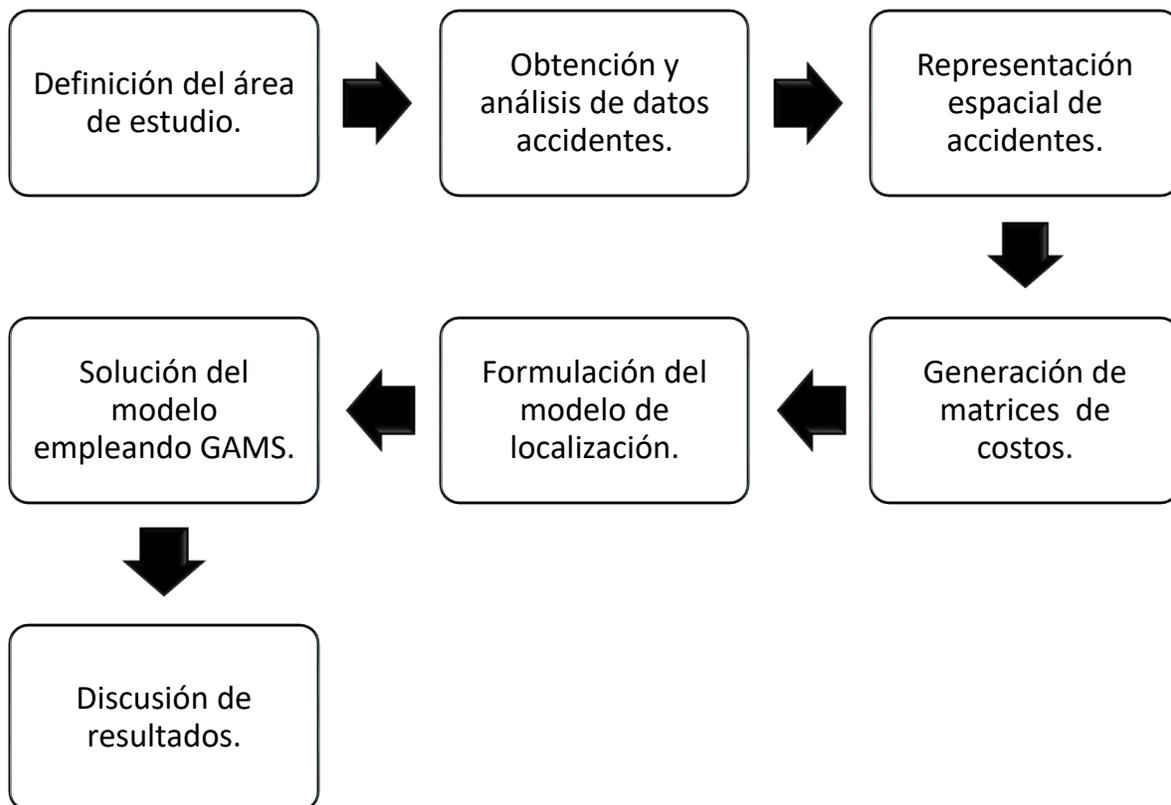
Pardillo Mayora (2004) menciona que estudios realizados en los Estados Unidos de América, Inglaterra y España, muestran la influencia de cada uno de los elementos que intervienen en la accidentabilidad y llegaron a conclusiones muy similares, teniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 11.

Tabla 11. Elementos involucrados en la siniestralidad vial y sus porcentajes de influencia.

Elemento involucrado en la siniestralidad vial	% aproximado de aportación a la ocurrencia del accidente
Factor humano	95
Camino y entorno	19
Vehículo	5.5

Fuente: (Pardillo Mayora, 2004)

3.2. Metodología utilizada.



Fuente: Elaboración propia en base a (Baeza, 2015; Correa, 2015; Zamora, 2015) .

3.2.1 Área de estudio.

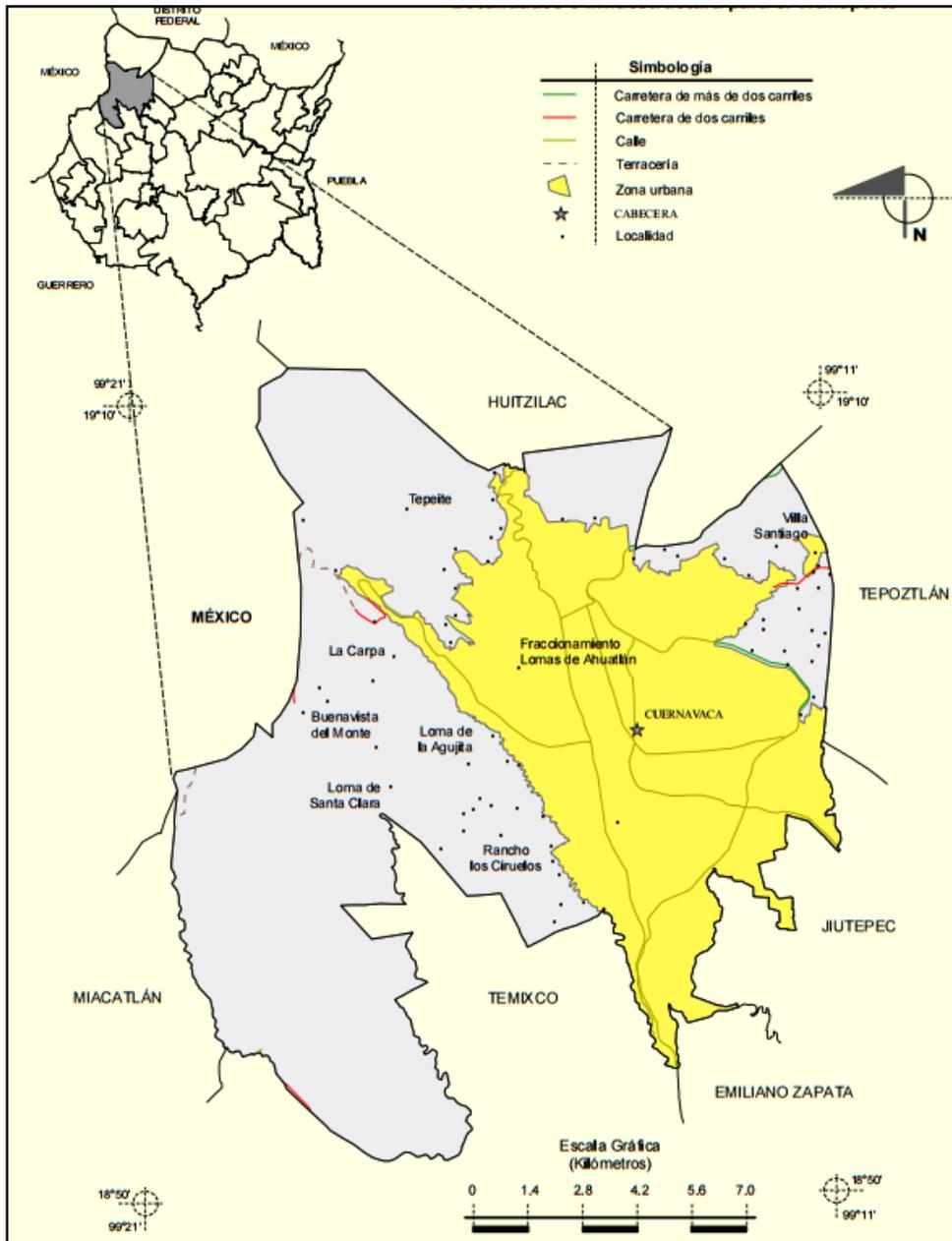
El municipio de Cuernavaca se encuentra localizado entre los paralelos 18° 50' y 19° 10' de latitud norte; los meridianos 99° 11' y 99° 21' de longitud oeste; altitud entre 1,100 y 3,000 m. Colinda al norte con el Estado de México y los municipios de Huitzilac y Tepoztlán; al este con los municipios de Tepoztlán, Jiutepec y Emiliano Zapata; al sur con los municipios de Emiliano Zapata, Temixco y Miacatlán; al oeste con el municipio Miacatlán y el Estado de México. Además ocupa el 4.11% de la superficie del estado con 200 km², cuenta con 52 localidades y al 2015 se estimó una población de 366,321² habitantes (INEGI, 2009).

Desde hace décadas existen como vías principales de comunicación, dos ejes verticales, formados por las carreteras federal y autopista, México-Cuernavaca-Acapulco y horizontales formados la avenida Plan de Ayala, Rio Mayo, San Diego, etc., alrededor de los cuales se han desarrollado las vías de acceso a las comunidades. Ejes que han sido totalmente rebasados por el crecimiento demográfico de los municipios y de una población flotante muy dinámica, además de un aumento de tráfico, principalmente generado por el crecimiento de la flota de automóviles particulares (Gobierno del Estado de Morelos, 2012).

En la ilustración 4 se puede observar la zona urbana de Cuernavaca, así como las principales localidades y vialidades como vías de comunicación.

² Extraído de http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mor/territorio/div_municipal.aspx?tema=me

Ilustración 6. Localidades e infraestructura de Cuernavaca.



Fuente: Prontuario de información geográfica municipal (INEGI, 2009)

3.2.2 Obtención y análisis de los datos de accidentes en Cuernavaca.

La información correspondiente a los accidentes fue proporcionada por el Secretariado Técnico del Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (STCONAPRA), que es la unidad administrativa de la Secretaría de Salud responsable de dirigir la política nacional en materia de prevención de lesiones ocasionadas por accidentes. El STCONAPRA implantó y está utilizando un sistema llamado Registro de Accidentes viales México (RavMex) en las todas las entidades del país, este sistema de base de datos permite ser administrado mediante un usuario que es el encargado de registrar los accidentes proporcionados por la Secretaría de Seguridad Pública, Policía Federal e Instituciones de Salud.

Los reportes proporcionados contienen información completa, ya que incluyen datos como localización GPS, fecha y hora de ocurrencia, condiciones del camino y medio ambiente, tipo y descripción del siniestro, tipo y número de vehículos implicados, gravedad (daños materiales, lesionados y/o muertos, tipo de zona, superficie de la vía, entre otros).

En la base de datos de Cuernavaca se realizó un análisis de los registros para verificar donde es que ocurrían los accidentes. El total de registros fue de 938, los cuales después de una depuración se comprobó que no todos los registros pertenecían al municipio de estudio, quedando una cifra final de 885 accidentes. En la Tabla 12 se muestra la información respecto al tipo de zona.

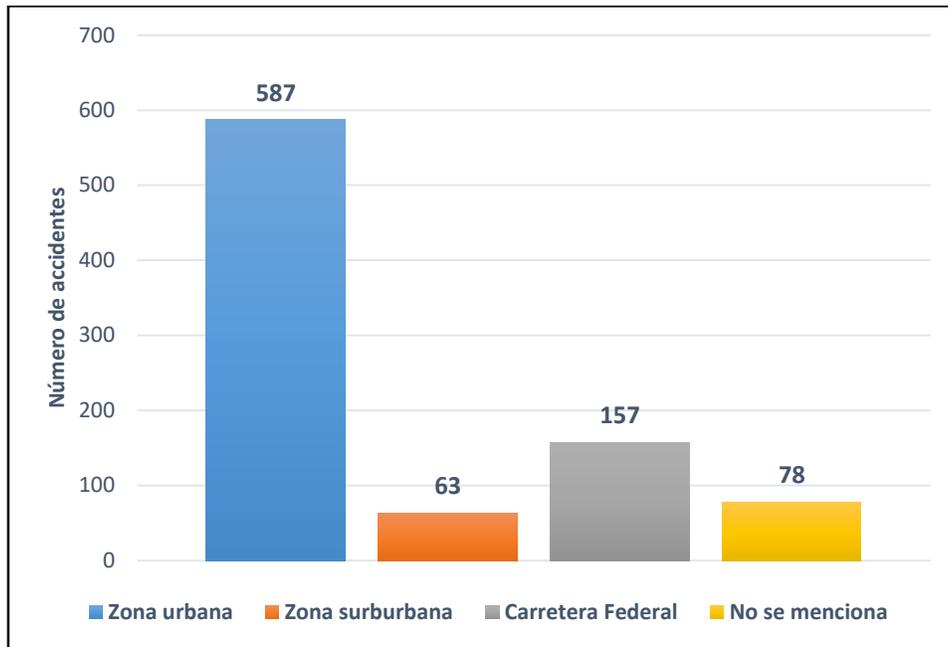
Tabla 12. Número de accidentes por tipo de zona en Cuernavaca.

Tipo de zona	No. Accidentes
Zona urbana	587
Zona suburbana	63
Carretera Federal	157
No se menciona	78
Total	885

Fuente: Elaboración propia con datos RavMex (2015-16).

Donde se presenta el mayor número de accidentes es en la zona urbana con 587 accidentes, seguido por la carretera federal con 157, lo cual representan el 66% y 18 % respectivamente. Esto se observa más claramente en la gráfica 2 que se muestran a continuación.

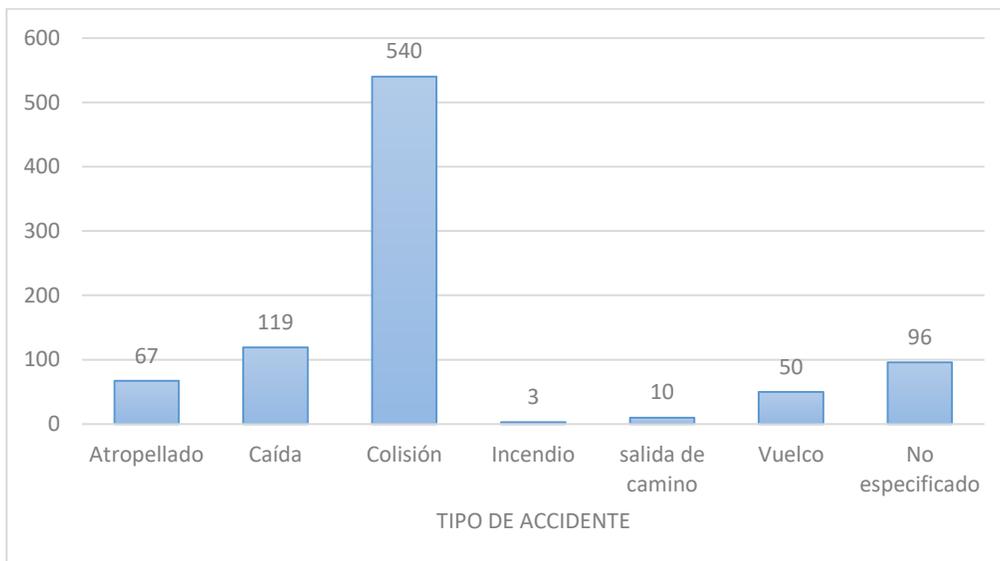
Gráfica 2. Accidentes por tipo de zona.



Fuente: Elaboración propia con datos RavMex (2015-16).

En los datos proporcionados por CONAPRA se encontraron tipos de accidentes como vuelco, colisión, atropellado, salida de camino y son representados en la gráfica 3.

Gráfica 3. Tipos de accidentes de la base de datos RavMex.

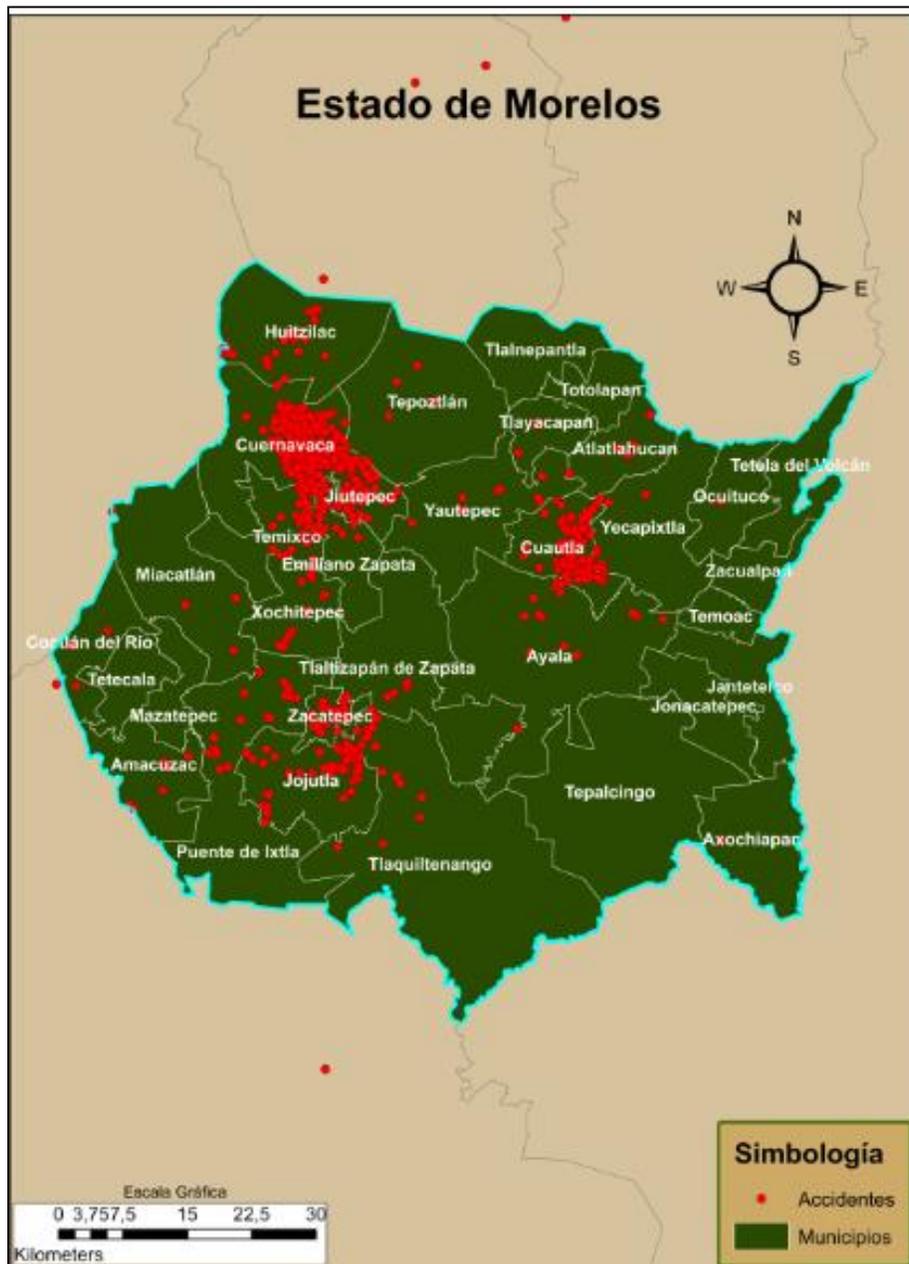


Fuente: Elaboración propia en con datos RavMex (2005-16)

3.2.3 Representación espacial de los accidentes.

En primera instancia para la ubicación espacial de los accidentes es necesaria la cartografía del estado y municipios de Morelos, esta fue obtenida de INEGI (2013). El siguiente paso es generar información a través del sistema de información geográfica (SIG) que básicamente consiste en la ubicación espacial de los accidentes, generando así la capa temática de los datos geográficos tal y como se muestra en la ilustración 6.

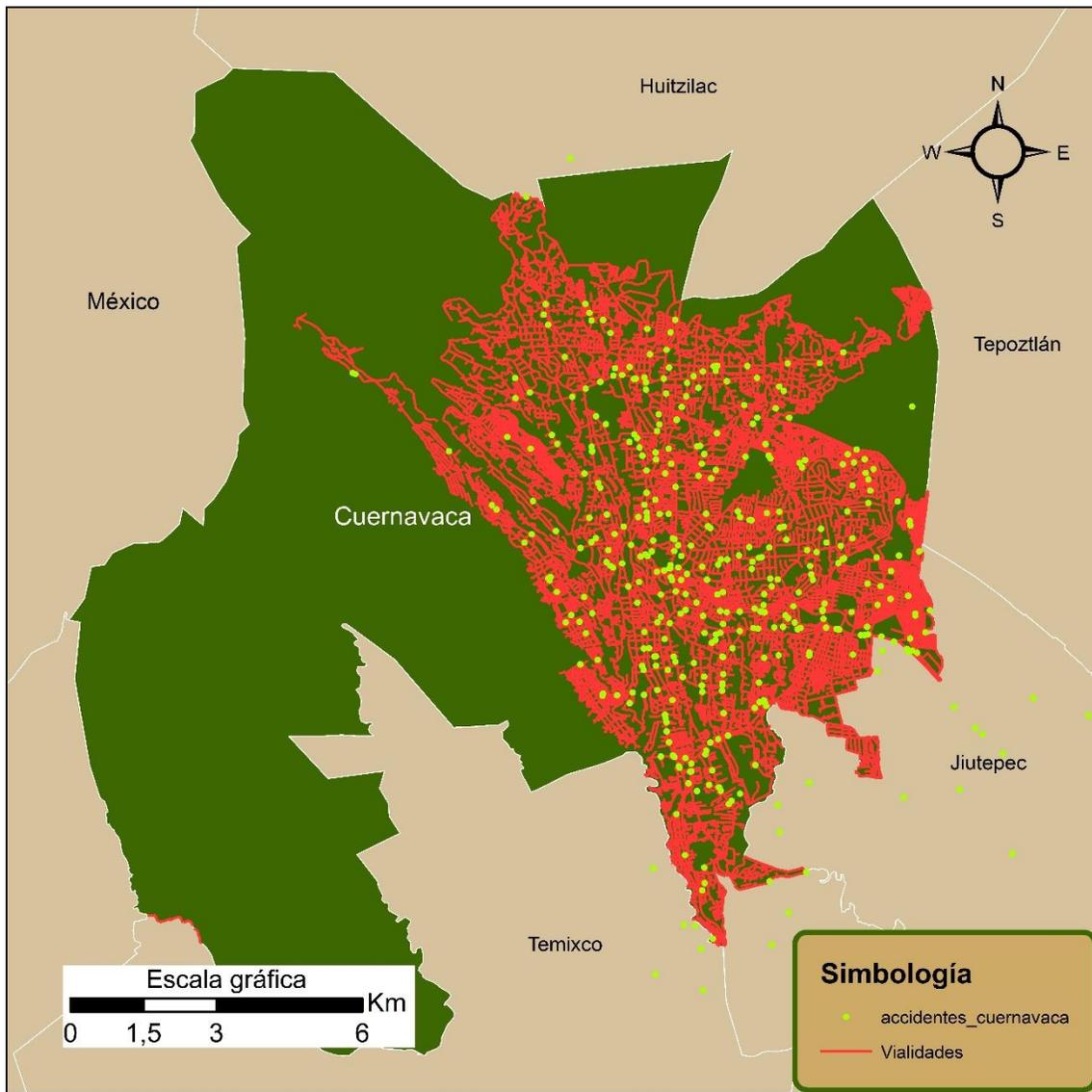
Ilustración 7. Distribución espacial de los accidentes en Morelos.



Fuente: Elaboración propia con datos RavMex (2015-16).

De igual manera se realizó lo mismo para el municipio de Cuernavaca, en este caso también agregamos la capa de vialidades municipal, como se muestra en la ilustración 7, esto con el fin de identificar las vialidades principales.

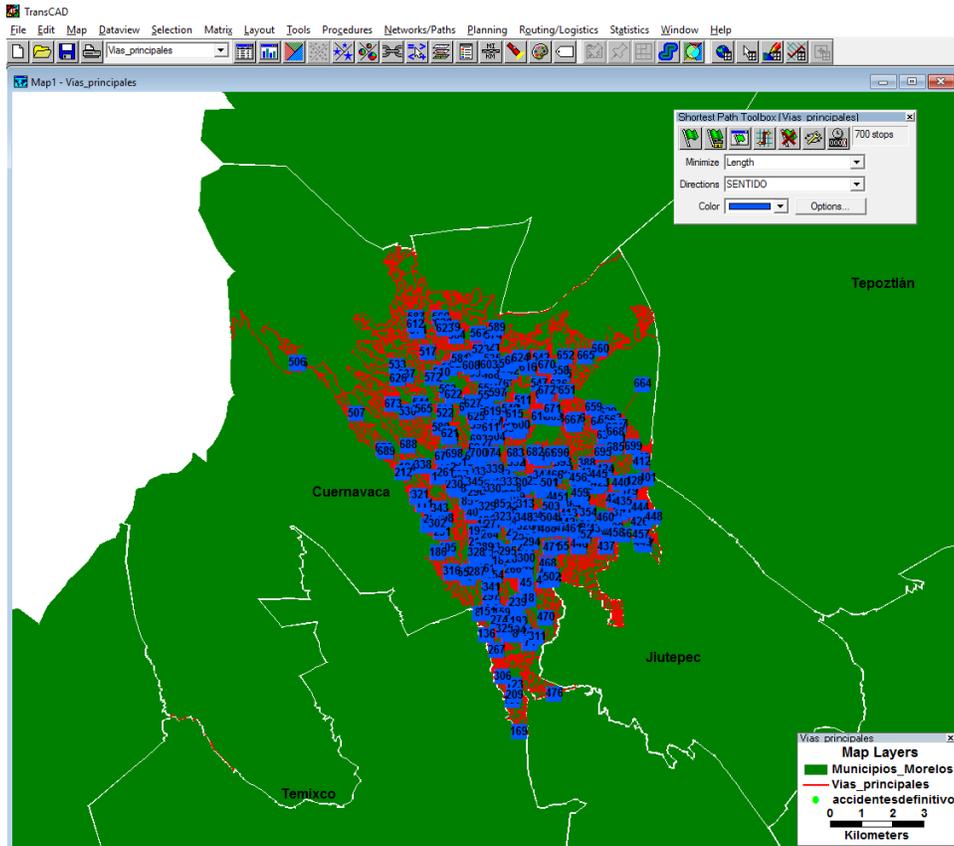
Ilustración 8. Distribución de accidentes y vialidades de Cuernavaca.



Fuente: Elaboración propia con datos RavMex (2015-16).

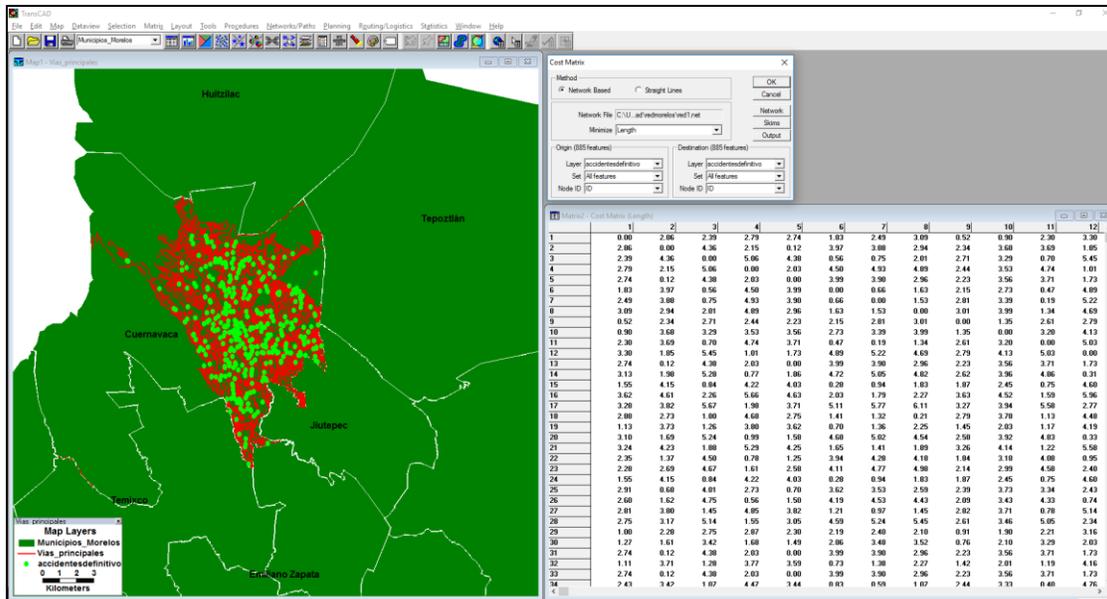
Tomaremos a las vialidades y accidentes como una red representada por nodos y arcos, de esta manera y con ayuda del SIG TransCAD (2002) se podrá generar una matriz de costos, en nuestro caso una matriz de distancias mínimas entre nodos (accidentes) que nos ayuda posteriormente a resolver el modelo. Para generar dicha matriz utilizamos las herramientas de TransCAD (2002) llamadas Shortest Path y Matrix Cost como se muestra en la ilustración 8 y 9.

Ilustración 9. Herramienta Shortest Path para distancias mínimas entre accidentes.



Fuente: Elaboración propia con datos RavMex (2015-16).

Ilustración 10. Herramienta Matrix Cost para matriz de distancias entre accidentes.



Fuente: Elaboración propia con datos RavMex (2015-16).

3.2.5 Formulación del modelo matemático.

Las calles pueden ser modeladas como una red considerando los retornos y puentes

Donde:

i = Sitios candidatos para localizar una instalación de emergencia. $i = 1, \dots, m$

j = Los nodos de los accidentes. $j = 1, \dots, n$

t_{ij} = Tiempo de viaje entre el nodo de demanda j y el nodo candidato i

q = Proporción de accidentes que, al menos, debe ser cubierto (ϵ)

p = Máximo número de servicios que puede ser instalados

a_j = Accidentes agrupados en cada nodo j

T = Tiempo máximo para los primeros auxilios

$x_i = 1$ si un servicio de emergencia es localizado en el nodo i , 0 en otro caso

$y_{ij} = 1$ si un servicio de emergencia localizado en el nodo i cubre el nodo j ,
0 en otro caso

Usando la notación anterior proponemos el modelo siguiente:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} y_{ij} \quad (18)$$

$$\text{Max} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_j y_{ij} \quad (19)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^m x_i \leq p \quad (20)$$

$$y_{ij} \leq x_i \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (21)$$

$$\sum_1^n y_{ij} \leq 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (22)$$

$$t_{ij}y_{ij} \leq T \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (23)$$

$$x_i \in \{0,1\}, y_{ij} \in \{0,1\} \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n \quad (24)$$

Considerando que la rápida atención representa más oportunidades de vida, el primer objetivo (18) es para maximizar el tiempo de respuesta desde la instalación hasta el accidente. También, se desea cubrir la mayor cantidad de accidentes como sea posible, así el segundo objetivo (19) consiste en maximizar la cobertura. La restricción (20) determina el número de servicios para localizar. La restricción (21) indica que solo es posible atender desde los servicios abiertos. La desigualdad (22) permite cubrir una demanda parcial. La restricción (23) impone un límite de tiempo para el tiempo de respuesta. La restricción (24) fuerza a las variables a ser binarias.

Para resolverlo es posible utilizar el enfoque de ϵ -restricciones o limitaciones, teniendo en cuenta al segundo objetivo como una restricción limitada por un número mínimo de accidentes para cubrir (q). Bajo este supuesto, el modelo puede reformularse de la siguiente manera:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij}y_{ij} \quad (25)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^m x_i \leq p \quad (26)$$

$$y_{ij} \leq x_i \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{ij} \leq 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (28)$$

$$t_{ij} y_{ij} \leq T \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (29)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_j y_{ij} \geq qC \quad (30)$$

$$x_i \in \{0,1\}, y_{ij} \in \{0,1\} \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n \quad (31)$$

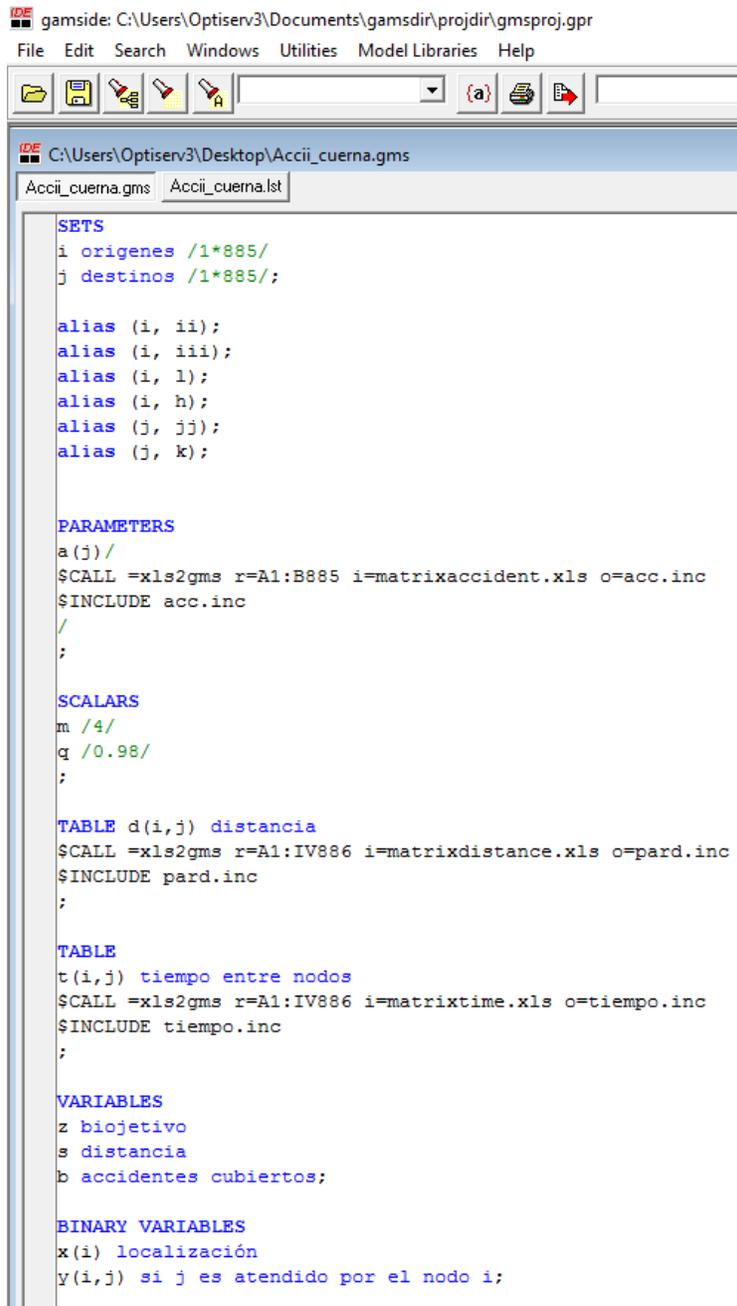
Donde C en la restricción (30) es el número total de accidentes y q indica la proporción de la atención y está dada por el tomador de decisiones.

3.2.6 Codificación del modelo utilizando GAMS

Para dar solución al modelo formulado utilizaremos el software GAMS (General Algebraic Modeling System). Se decidió realizar la codificación del modelo matemático en el lenguaje algebraico de modelado GAMS, porque además de ser uno de los que tienen una formulación sencilla, es uno de los más conocidos y ampliamente difundido comercialmente, asimismo, es el que cuenta con más usuarios. Además tiene una potente capacidad de indexación de las variables y ecuaciones y permite cambiar sin dificultad las dimensiones del modelo, también se pueden manejar modelos robustos e igualmente incluye CPLEX el mejor optimizador para problemas MIP (Ramos, Sánchez, Ferrer, Barquín, & Linares, 2010), que será el procedimiento utilizado para la resolución.

Como ya se mencionó utilizaremos para la resolución la programación entera mixta (Mixed Integer Programming MIP), ya que se representan mejor las decisiones en nuestro modelo que presenta variables enteras y binarias. En la ilustración 11 se muestra una parte de la codificación del modelo en GAMS.

Ilustración 11. Codificación del modelo bi-objetivo.



```
gamside: C:\Users\Optiserv3\Documents\gamsdir\projdir\gmsproj.gpr
File Edit Search Windows Utilities Model Libraries Help

C:\Users\Optiserv3\Desktop\Accii_cuerna.gms
Accii_cuerna.gms Accii_cuerna.lst

SETS
i origenes /1*885/
j destinos /1*885/;

alias (i, ii);
alias (i, iii);
alias (i, l);
alias (i, h);
alias (j, jj);
alias (j, k);

PARAMETERS
a(j)/
$CALL =xls2gms r=A1:B885 i=matrixaccident.xls o=acc.inc
$INCLUDE acc.inc
/
;

SCALARS
m /4/
q /0.98/
;

TABLE d(i,j) distancia
$CALL =xls2gms r=A1:IV886 i=matrixdistance.xls o=pard.inc
$INCLUDE pard.inc
;

TABLE
t(i,j) tiempo entre nodos
$CALL =xls2gms r=A1:IV886 i=matrixtime.xls o=tiempo.inc
$INCLUDE tiempo.inc
;

VARIABLES
z biojetivo
s distancia
b accidentes cubiertos;

BINARY VARIABLES
x(i) localización
y(i,j) si j es atendido por el nodo i;
```

Fuente: GAMS (2016).

Capítulo 4. Interpretación de resultados.

Considerando los tiempos de respuesta de 2,4 y 5 minutos, así como la velocidad de las ambulancias de 50 km/hr. Los resultados obtenidos utilizando el software GAMS para cada escenario se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Resultados.

Tiempo de respuesta (min)	No. Servicios	Nodos ubicación	No. Accidentes cubiertos	% de Cobertura	Accidentes requieren ambulancia
2	1	266	655	74	98
2	2	2, 263	796	89	121
2	3	2, 263, 655	848	95	131
2	4	2, 113, 263, 655	885	100	138
4	1	20	638	72	95
4	2	59, 799	834	92	128
4	3	59, 228, 799	870	98	136
4	4	59, 228, 623, 799	885	100	138
5	1	217	841	95	129
5	2	44, 197	868	98	136
5	3	29, 44, 197	885	100	138

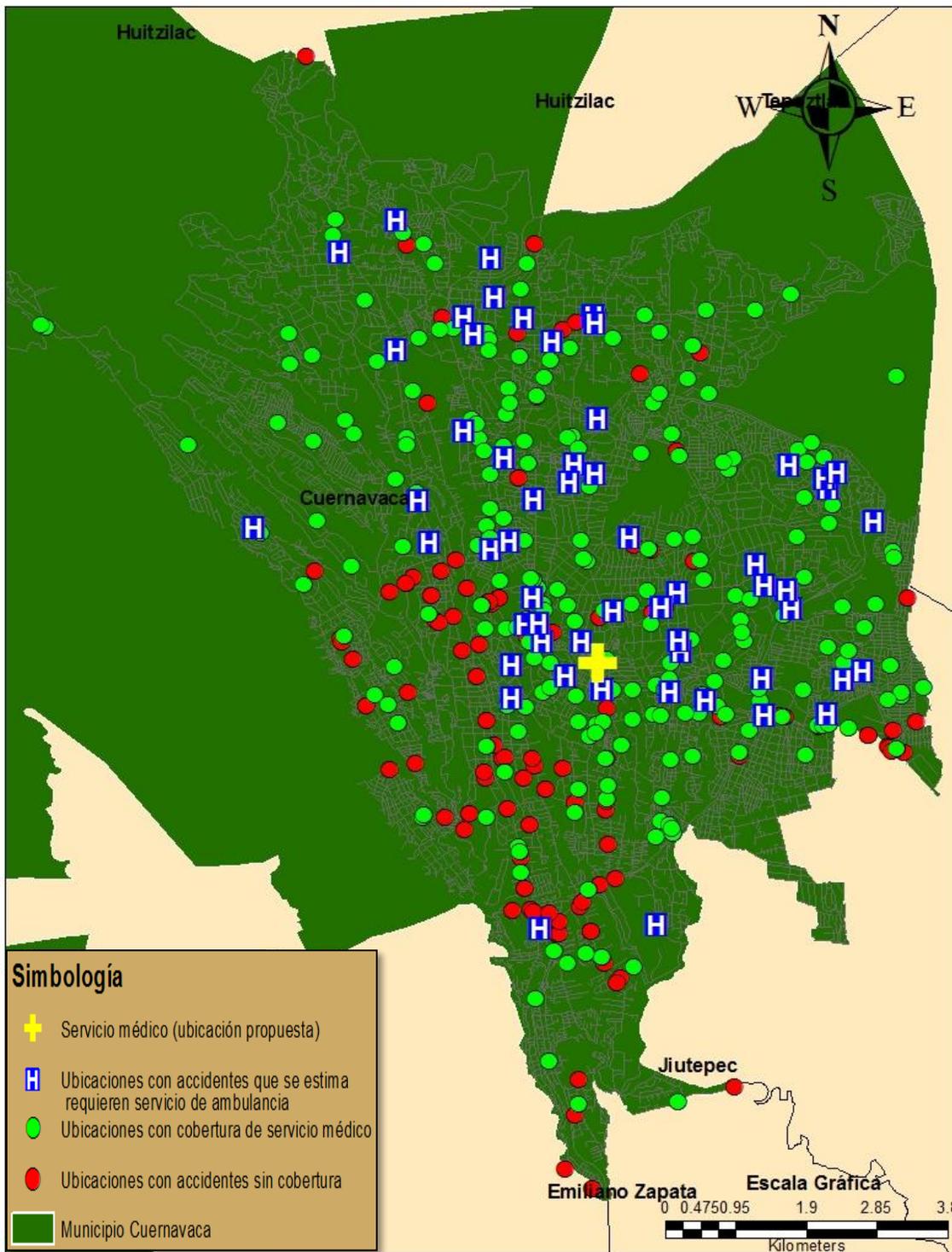
Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos de (GAMS, 2016).

Ahora bien para representar la localización de los servicios médicos de emergencia de cada uno de los escenarios propuestos utilizaremos ArcMap (2010) y la simbología que se muestra en la ilustración 12 siguiente:

Ilustración 12. Simbología utilizada para representar los resultados.

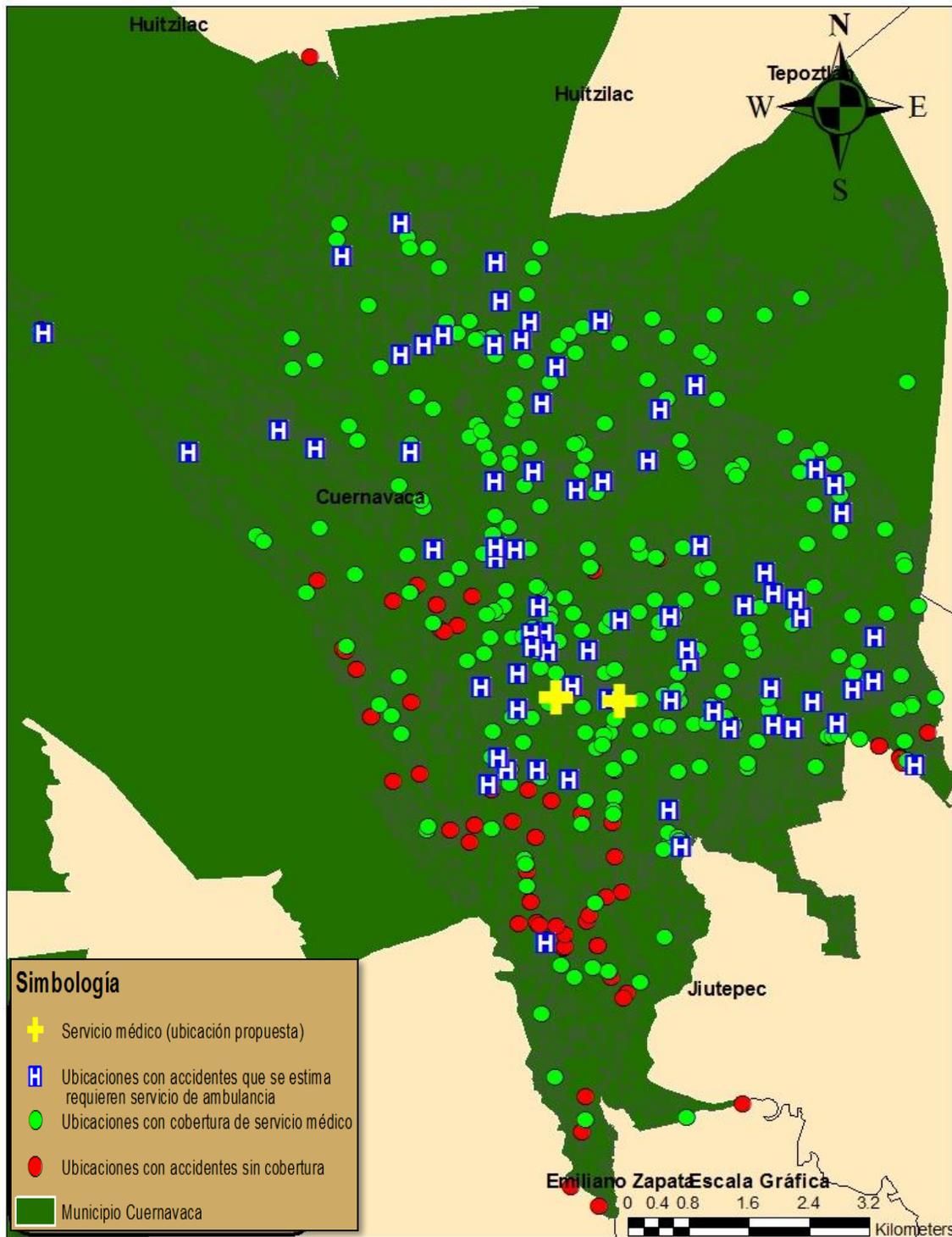
Simbología	
	Servicio médico (ubicación propuesta)
	Ubicaciones con accidentes que se estima requieren servicio de ambulancia
	Ubicaciones con cobertura de servicio médico
	Ubicaciones con accidentes sin cobertura
	Municipio Cuernavaca

Ilustración 13. Un servicio médico con tiempo de respuesta de 2 minutos.



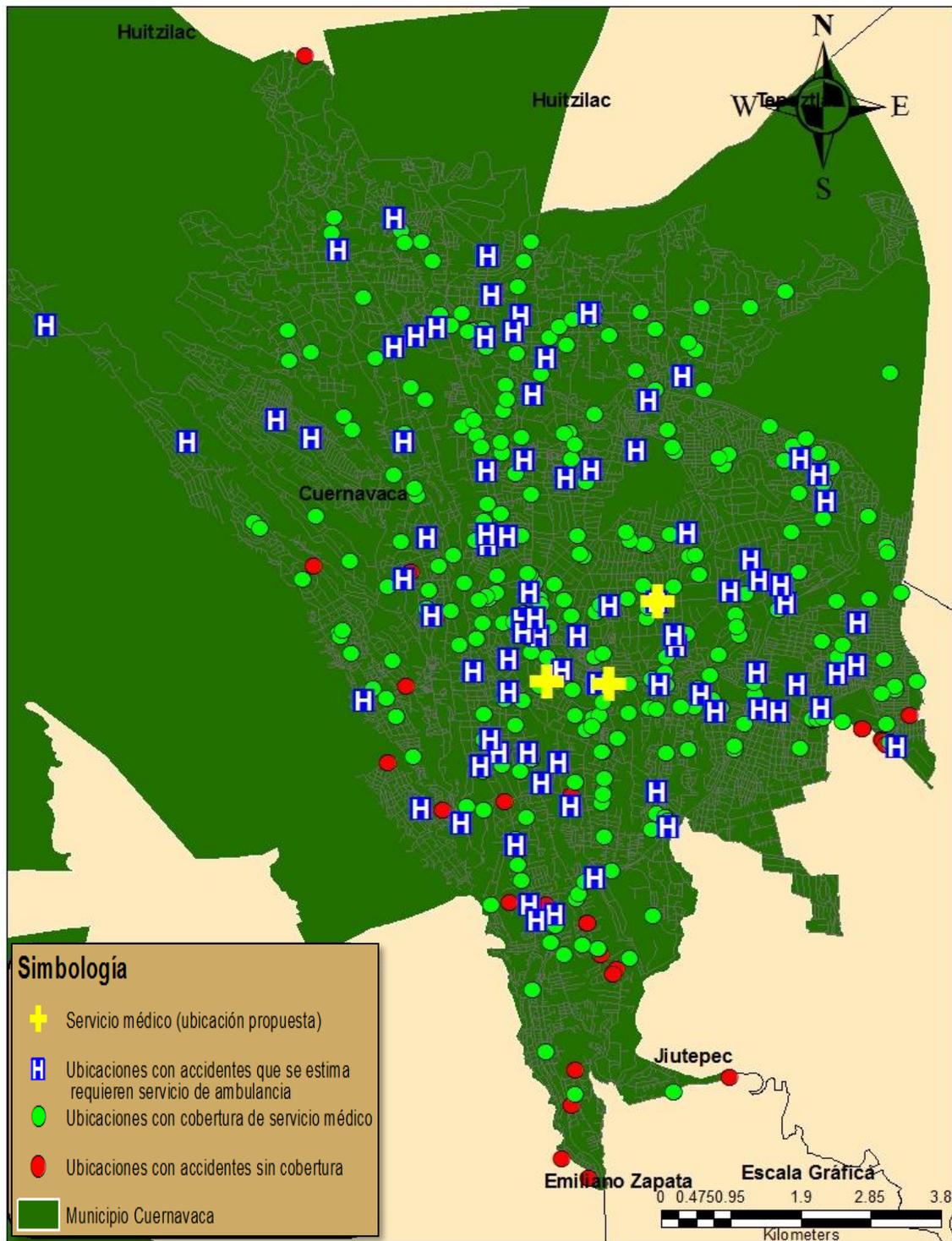
Fuente: Elaboración propia con datos Ravex (2015-16) y resultados con GAMS.

Ilustración 14. Dos servicios médicos con tiempo de respuesta de 2 minutos.



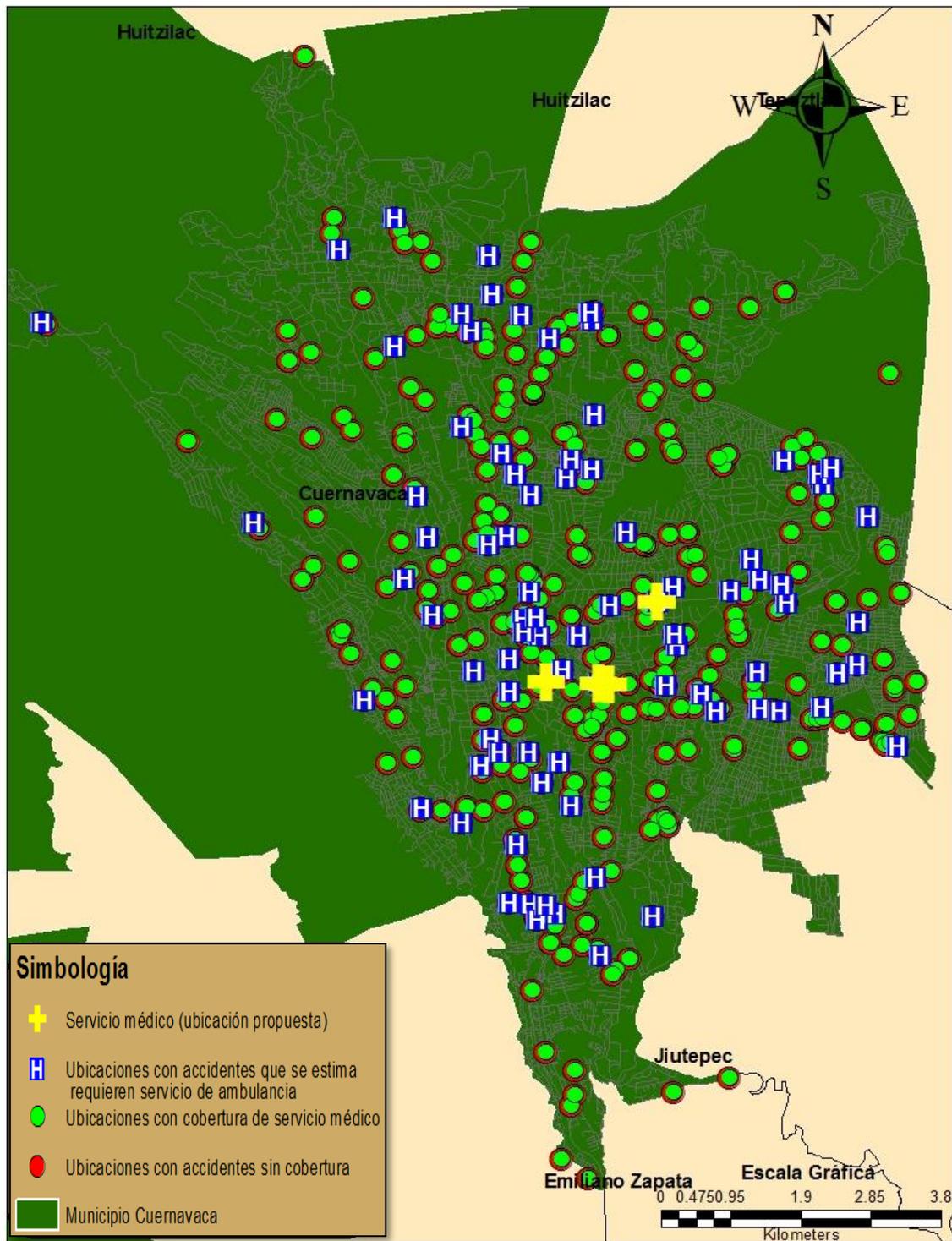
Fuente: Elaboración propia con datos Ravex (2015-16) y resultados con GAMS.

Ilustración 15. Tres servicios médicos con tiempo de respuesta de 2 minutos.



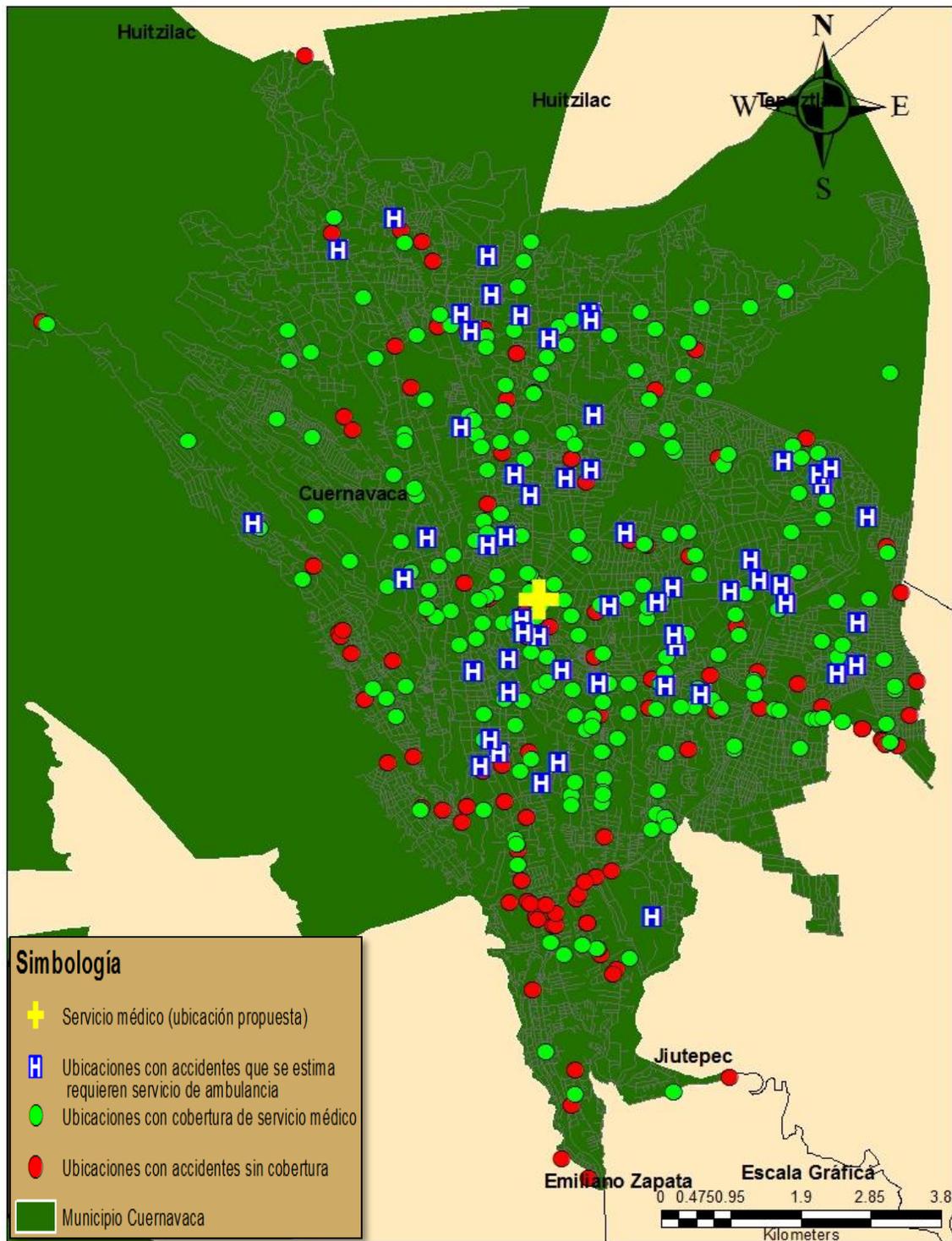
Fuente: Elaboración propia con datos Ravex (2015-16) y resultados con GAMS.

Ilustración 16. Cuatro servicios médicos con tiempo de respuesta de 2 minutos.



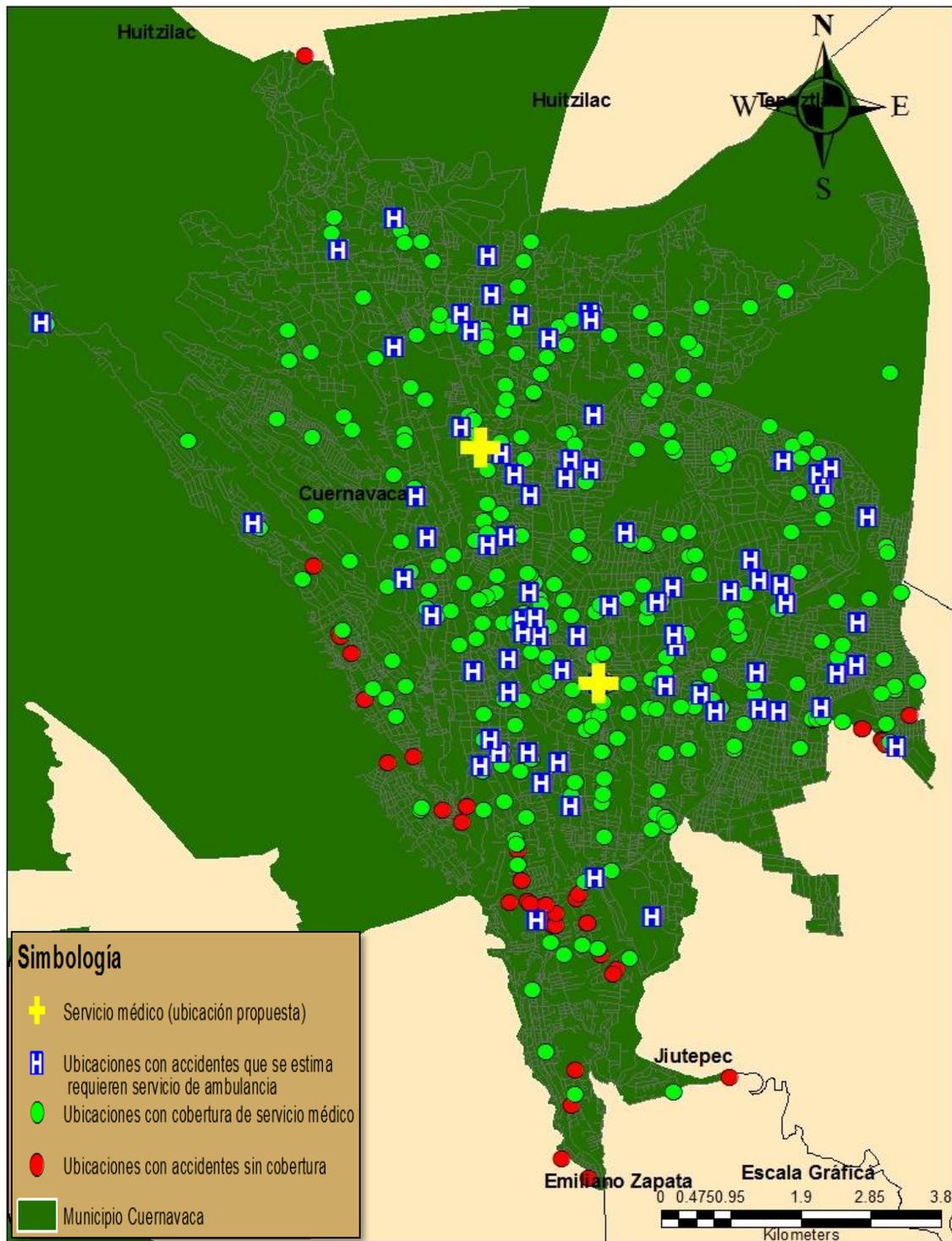
Fuente: Elaboración propia con datos Ravex (2015-16) y resultados con GAMS.

Ilustración 17. Un servicio médico con tiempo de respuesta de 4 minutos.



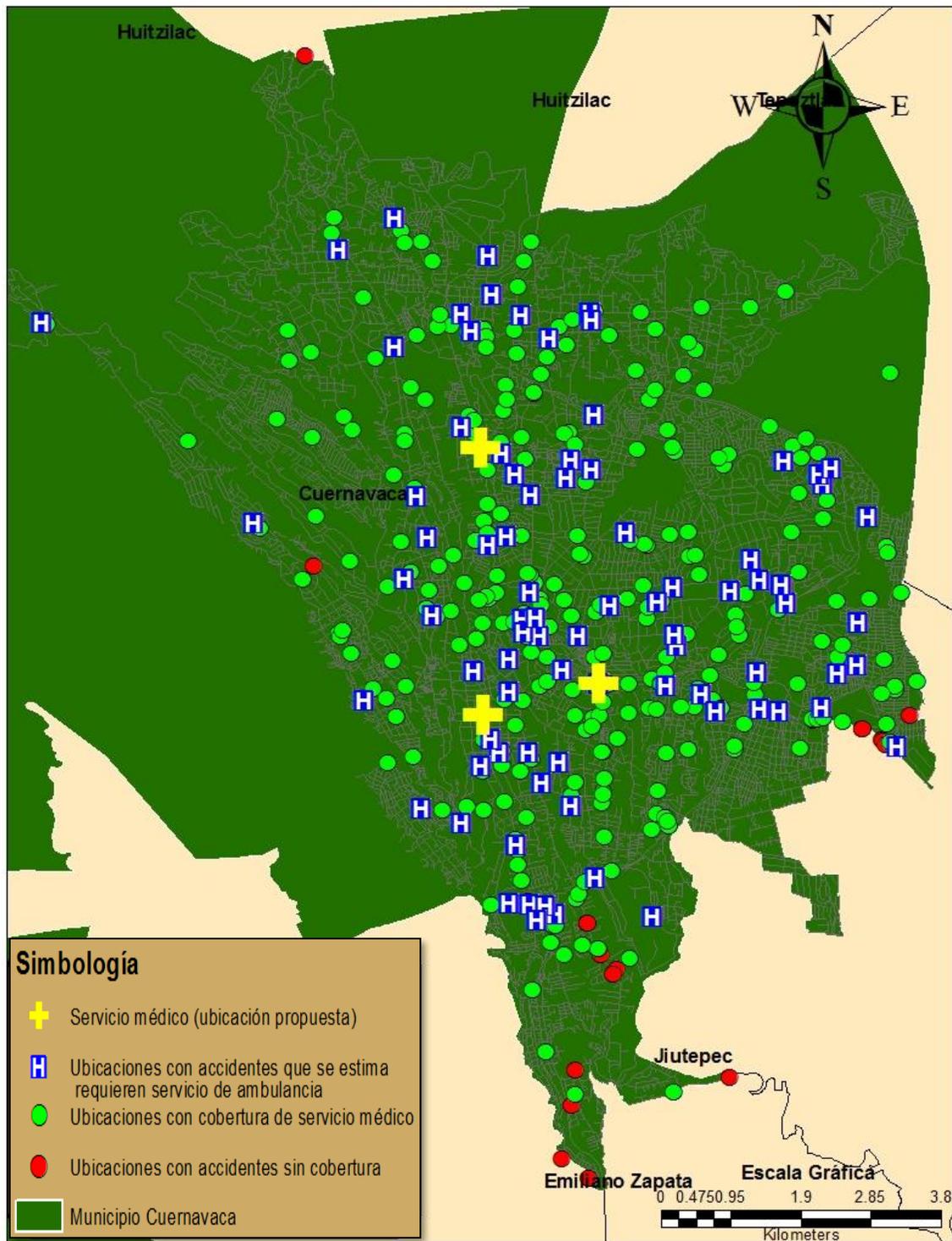
Fuente: Elaboración propia con datos Ravex (2015-16) y resultados con GAMS.

Ilustración 18. Dos servicios médicos con tiempo de respuesta de 4 minutos.



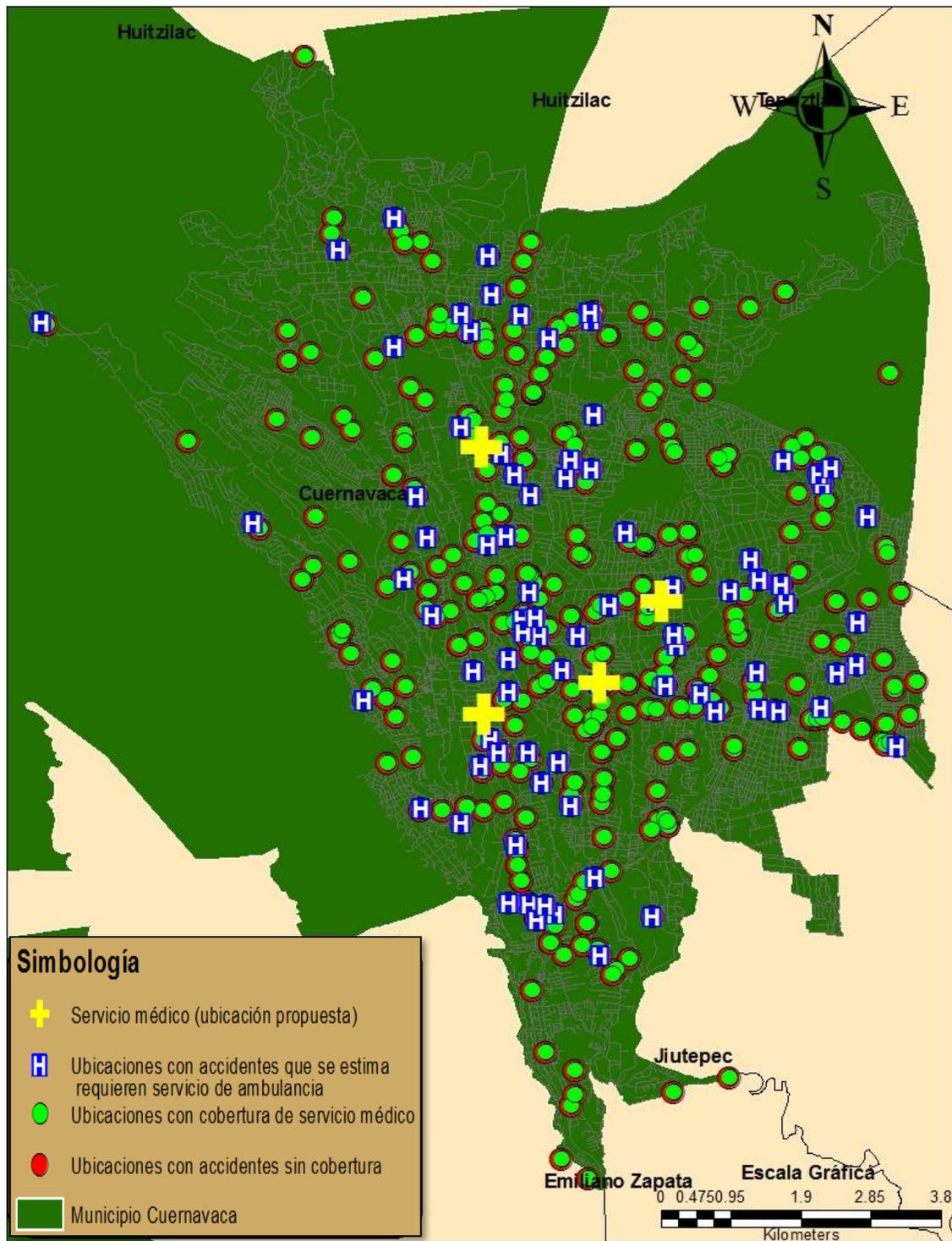
Fuente: Elaboración propia con datos Ravex (2015-16) y resultados con GAMS.

Ilustración 19. Tres servicios médicos con tiempo de respuesta de 4 minutos.



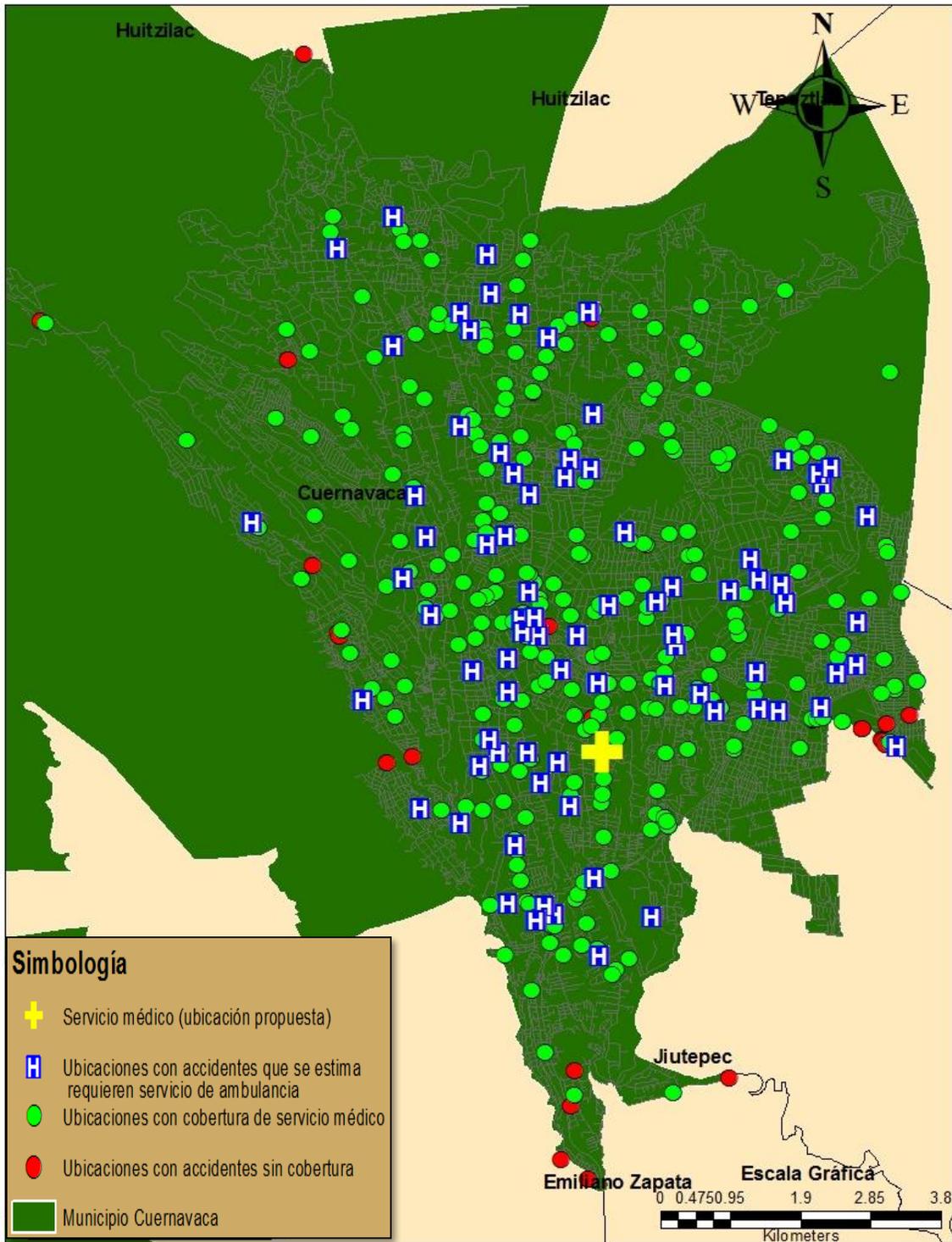
Fuente: Elaboración propia con datos Ravex (2015-16) y resultados con GAMS.

Ilustración 20. Cuatro servicios médicos con tiempo de respuesta de 4 minutos.



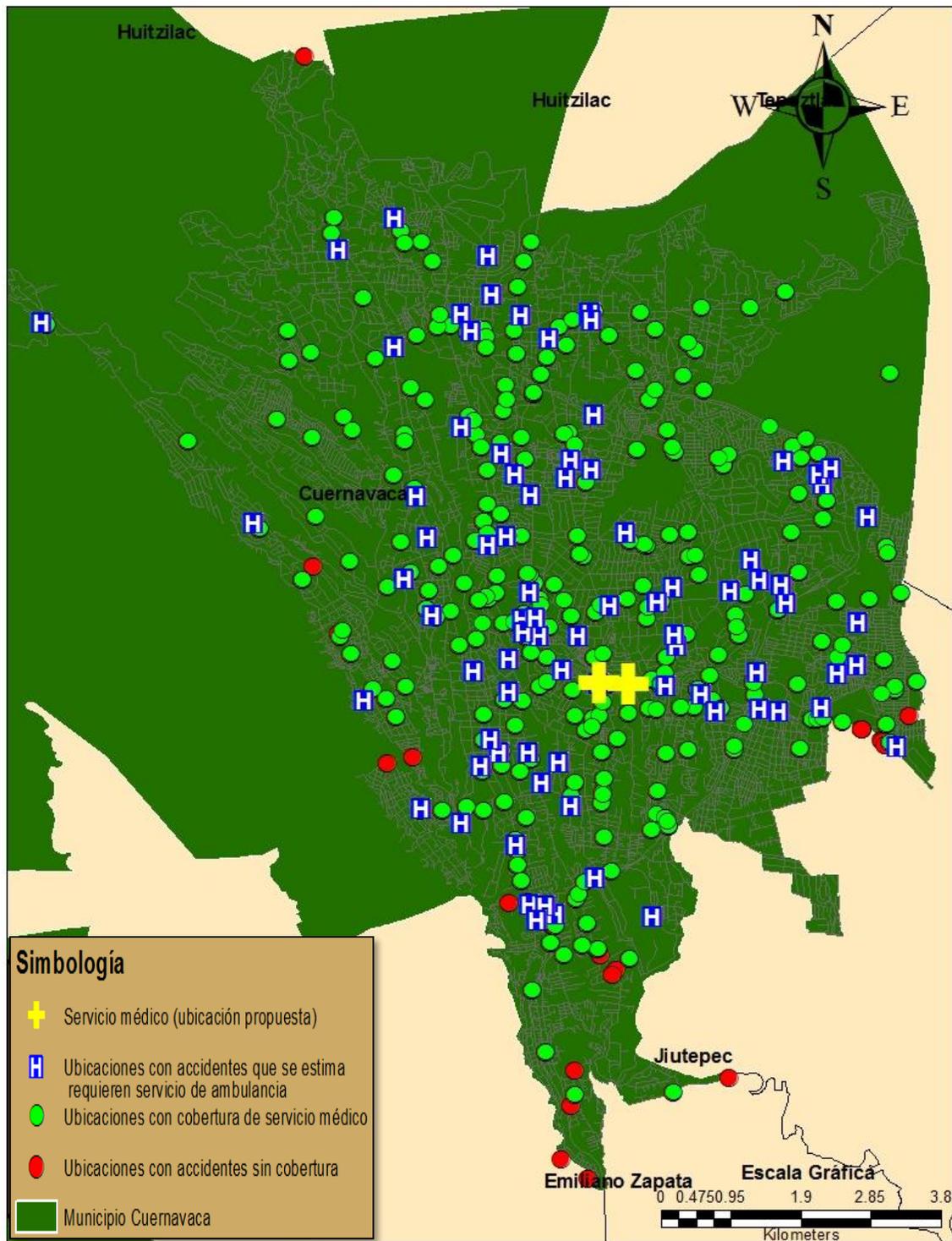
Fuente: Elaboración propia con datos Ravex (2015-16) y resultados con GAMS.

Ilustración 21. Un servicio médico con tiempo de respuesta de 5 minutos.



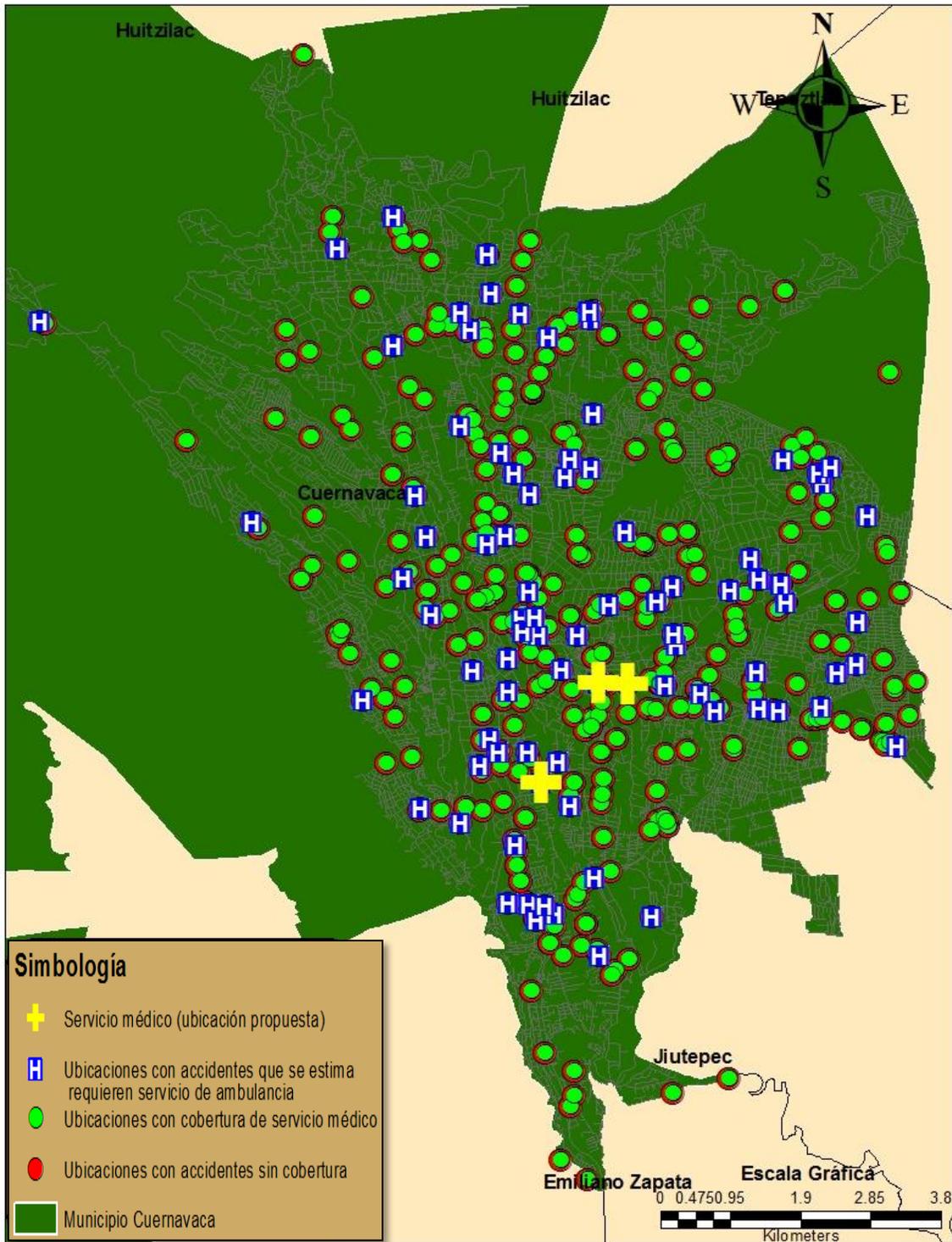
Fuente: Elaboración propia con datos Ravex (2015-16) y resultados con GAMS.

Ilustración 22. Dos servicios médicos con tiempo de respuesta de 5 minutos.



Fuente: Elaboración propia con datos Ravex (2015-16) y resultados con GAMS.

Ilustración 23. Tres servicios médicos con tiempo de respuesta de 5 minutos.

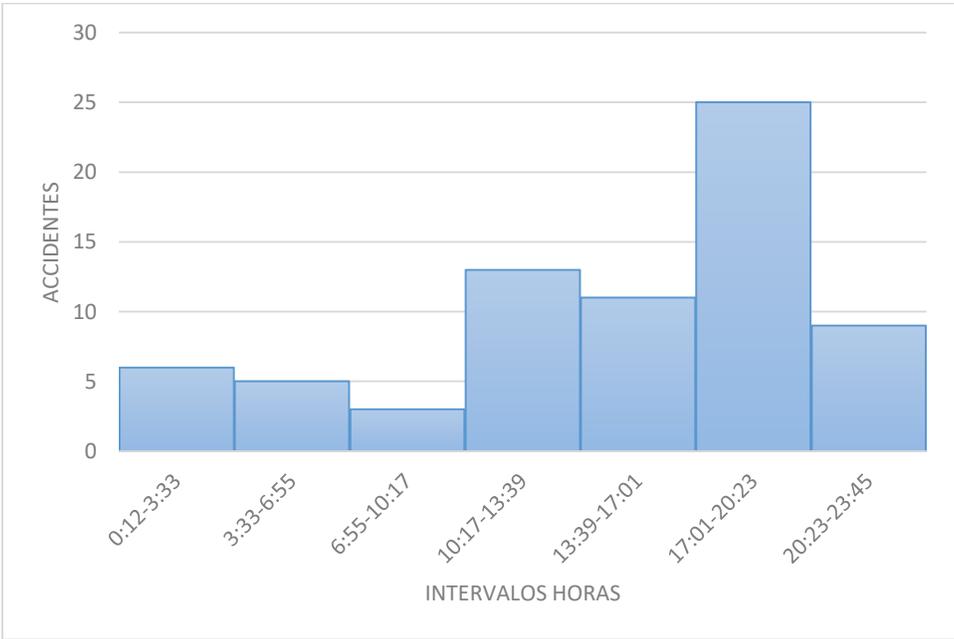


Fuente: Elaboración propia con datos Ravex (2015-16) y resultados con GAMS.

Para poder explicar cómo se obtienen los porcentajes de cobertura obtenidos es importante analizar la distribución de los accidentes, para esto tomaremos un mes y día aleatoriamente y se observa su comportamiento. La finalidad de analizar un mes es para mostrar que los accidentes tienen temporalidad y ocurren a determinadas horas del día, así se tendrán identificados los horarios con mayor número de accidentes y tener todos los recursos necesarios para cubrir la demanda.

El mes aleatorio se muestra en gráfica 4 y describe el comportamiento de los accidentes, resultando que entre las 17:00 a 20:30 aproximadamente, es el horario con mayor número de accidentes.

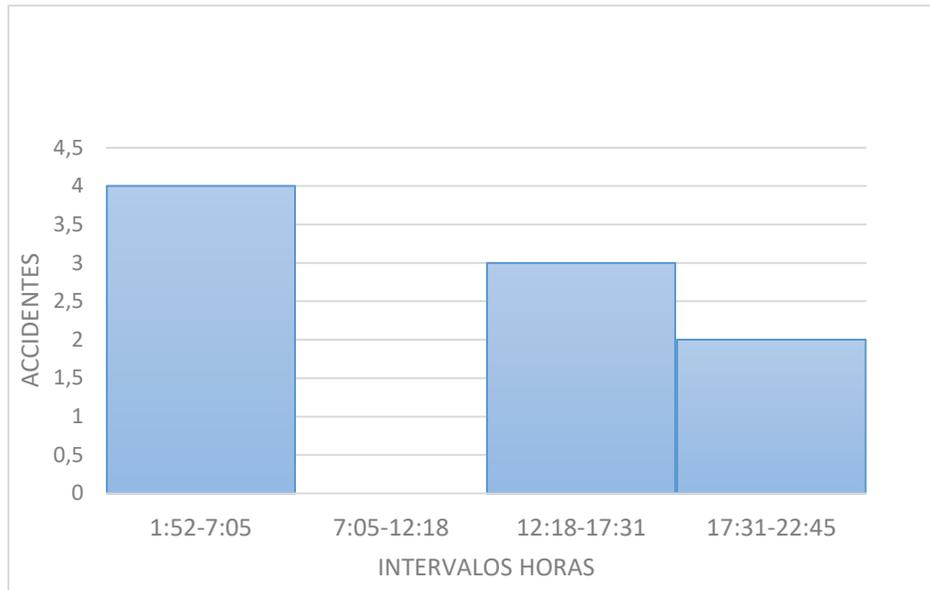
Gráfica 4. Distribución de accidentes por intervalos de tiempo en un mes.



Fuente: Elaboración propia con datos Ravex (2015-16).

Ahora bien, si hacemos el mismo análisis, pero ahora en otro día, resulta que en ese día ocurrieron 9 accidentes y es de 1:00 a 7:00 de la mañana aproximadamente donde se presentan más accidentes, como se describe en la gráfica 5.

Gráfica 5. Distribución de accidentes por intervalos de tiempo en un día.

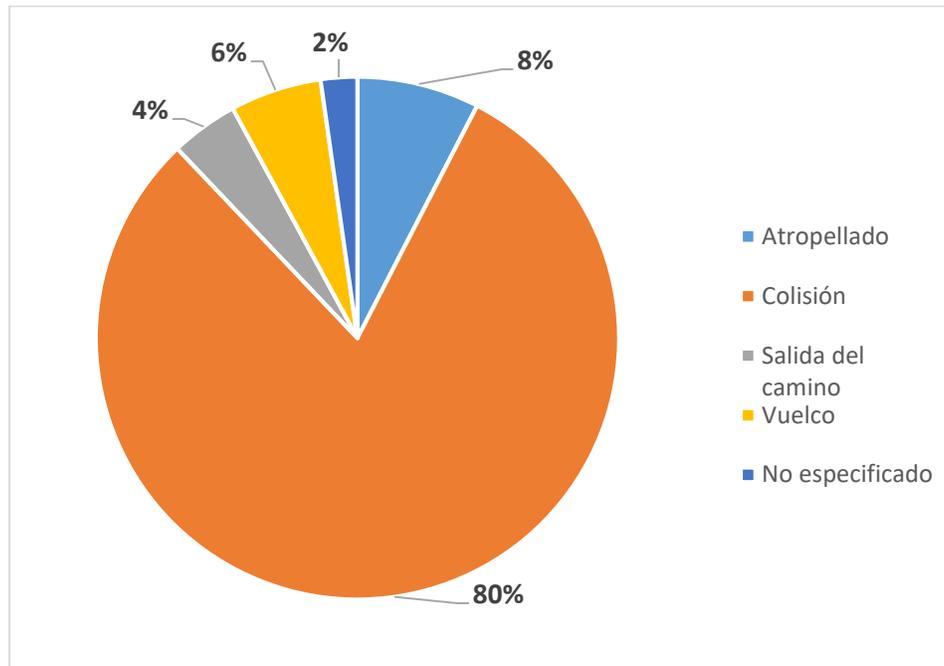


Fuente: Elaboración propia con datos Ravex (2015-16).

De igual forma es importante saber el tipo de accidente que ocurre para determinar si es necesario o no un servicio médico de emergencia. En la gráfica 6 se muestran los diferentes tipos de accidentes que se tienen registrados en Cuernavaca, Morelos. Se observa que las colisiones representan el 80% y al no mencionar qué tipo de colisión es, tomaremos el supuesto que es una colisión entre vehículos y no precisa de servicio médico de emergencia. Por el contrario, atropellado, vuelco y salida del camino debido a su impacto son los que si necesitarán de una ambulancia.

En la base de datos de RavMex se categoriza que los peatones y las personas involucradas en los accidentes de tránsito podían resultar con uno de los siguientes estados después del accidente *ilesa, leve, grave y muerto*. Aunque suponer que los accidentes que requieren ambulancia son atropellados, vuelco y salida del camino es con la finalidad de homogeneizar los datos, ya que no se menciona en muchos otros si son motociclistas o ciclistas. Si bien la severidad del accidente no está relacionada directamente con el tipo de accidente, la probabilidad de heridos graves o muertes presenta una mayor probabilidad para los peatones, ocupantes y motociclistas debido a la exposición que tienen.

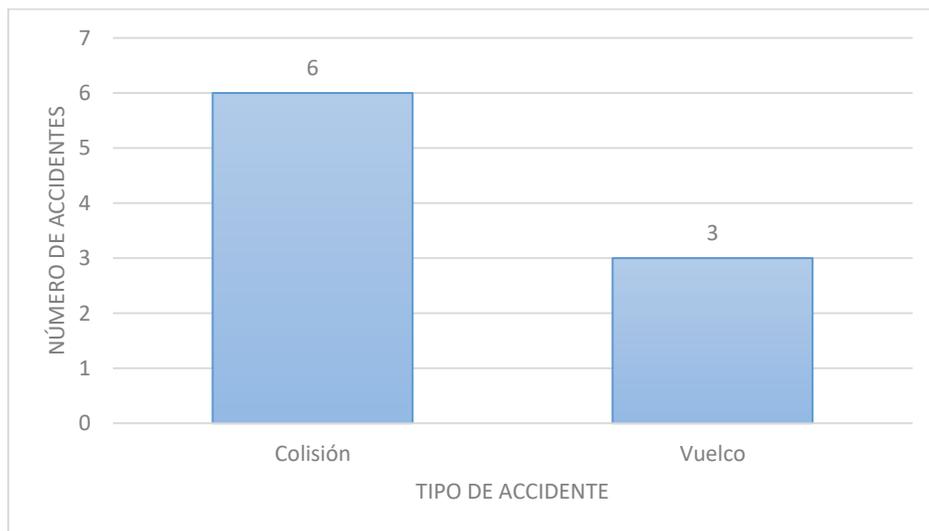
Gráfica 6. Tipos de accidentes registrados en Cuernavaca.



Fuente: Elaboración propia con datos Ravex (2015-16).

Podemos ejemplificar para el día aleatorio descrito anteriormente en el cual ocurren 9 accidentes, y sólo en tres de ellos será preciso enviar una ambulancia, ya que estos son del tipo volcadura, como se muestra en la gráfica 7. Y de igual forma se hizo el análisis para los demás días, con lo que se obtuvo la cantidad de accidentes que realmente requieren del servicio de emergencia (ambulancia).

Gráfica 7. Tipos de accidentes que precisan de ambulancia.



Fuente: Elaboración propia con datos Ravex (2015-16).

Capítulo 5. Conclusiones.

En este estudio de accidentes de tránsito se expone una alternativa más para la prevención e intervención de la seguridad vial, porque es evidente que el tiempo de respuesta necesario para llegar al paciente debe ser mínimo y más en un entorno urbanizado, con viviendas de alta densidad y ambiente comercial. Minimizar cada uno de los retrasos en los componentes del tiempo de la prestación de un servicio médico de emergencia debe ser enfocado a mejorar los resultados de los factores de riesgo que les afectan.

Al proponer un modelo bi-objetivo se tiene la oportunidad de mostrarle al tomador de decisiones los posibles escenarios que se evaluaron y al incorporar ambos objetivos al modelo matemático se logra una solución simple, pero con fundamento científico, lo que permite alternativas que conllevan cobertura y tiempo de respuesta, de esta manera el tomador de decisiones según su preferencia decidirá que es más importante cobertura o tiempo de respuesta.

De esta manera como se observa en los resultados, un mayor número de servicios médicos proporciona una mayor cobertura de los accidentes, pero considerando que no todos los accidentes que se presentan ocurren en el mismo lugar y momento, se puede reflexionar sobre un tiempo de respuesta que sea el adecuado para aumentar la probabilidad de vida de las víctimas. Esto ayudara al tomador de decisiones a determinar el número de servicios a localizar, además de que la evaluación implica una parte económica o de costo que tendría la ubicación de los servicios médicos, aspecto que no es considerado en este trabajo.

Ahora bien el modelo propuesto en este trabajo cumple con los objetivos deseados, pero también hay mejoras posibles que se pueden realizar, se puede formular un modelo en el cual se analicen las características de los accidentes, características geográficas y climáticas de la zona. También se podría modificar y formularse para tener un enfoque dinámico y agregar variables como disponibilidad de ambulancias, etc. Esto de cierta manera lleva al tomador de decisiones a evaluar el equipamiento de las ambulancias, que el suministro de los medicamentos, equipos y personal capacitado este en la instalación propuesta.

Si bien determinar los costos asociados a los accidentes de tránsito no es tarea fácil debido a los diferentes factores valores que intervienen, tales como la vida humana. Sin embargo, realizar una estimación del costo de los accidentes es significativo porque muestra a los tomadores de decisiones la importancia de las actividades destinadas a la prevención, pero de igual manera es importante para la sociedad en general, como lo menciona (Pérez-Núñez et al., 2011) ya que el problema también afecta la situación económica de los diferentes estratos sociales,

dado que las familias que tienen que pagar de su bolsillo por los altos e inesperados gastos provoca de cierta manera endeudamiento y empobrecimiento de éstas.

Sin duda los sistemas de información geográfica y su vasto campo de aplicaciones son una herramienta de apoyo que refleja que es necesario saber cómo utilizarlos, ya que no solo facilita el trabajo, sino que también brinda soluciones precisas y te brinda una perspectiva diferente de cómo afrontar los problemas en los que se está trabajando.

Como trabajo futuro sería determinar las ubicaciones en base a los resultados obtenidos, es decir, los resultados pueden presentar ubicaciones en las cuales se esté en medio de un parque, en una casa, etc. Lo importante sería tomar como referencia las estaciones de bomberos, policías, hospitales y sitios en los cuales la ubicación de las instalaciones sea de manera simple, hablando de adaptarlas. Esta evaluación tendrá que ser realizada por el tomador de decisiones, una vez que determine el número de instalaciones. los criterios de cobertura y tiempo de respuesta que se definan.

Referencias.

- Aceves, R. (1985). *Localización de servicios, modelos y Aplicaciones (Tesis de Maestría)*. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Ali, M., Miyoshi, C., & Ushijima, H. (2006). Emergency medical services in Islamabad, Pakistan: a public–private partnership. *Public Health*, 120(1), 50–57. <http://doi.org/10.1016/j.puhe.2005.03.009>
- An, S., Cui, N., Bai, Y., Xie, W., Chen, M., & Ouyang, Y. (2015). Reliable emergency service facility location under facility disruption, en-route congestion and in-facility queuing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 82, 199–216. <http://doi.org/10.1016/j.tre.2015.07.006>
- ArcMap. (2010). España: Versión 10, Licencia de evaluación.
- Arnold, J. L. (1999). International Emergency Medicine and the Recent Development of Emergency Medicine Worldwide. *Annals of Emergency Medicine*, 33(1), 97–103. [http://doi.org/10.1016/S0196-0644\(99\)70424-5](http://doi.org/10.1016/S0196-0644(99)70424-5)
- Auerbach, M. P. (2015). Geographic information systems (GIS). *Research Starter*. Retrieved from <http://eds.b.ebscohost.com/eds/detail/detail?sid=eac38562-2f41-4775-af43-c8c5a7eef645%40sessionmgr106&vid=2&hid=127&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZQ%3d%3d#AN=88806495&db=ers>
- Baeza, A. (2015). *Propuesta metodológica para el análisis de la accidentabilidad ocasionada por el transporte público de pasajeros en el Distrito Federal (Tesis de Maestría)*. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Baray, J., & Cliquet, G. (2013). Optimizing locations through a maximum covering/p-median hierarchical model: Maternity hospitals in France. *Journal of Business Research*, 66(1), 127–132. <http://doi.org/10.1016/j.jbusres.2012.09.003>
- Beraldi, P., & Bruni, M. E. (2008). A probabilistic model applied to emergency service vehicle location. *European Journal of Operational Research*, 196, 323–331. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.02.027>
- Bird, F. E., & Germain, G. L. (1985). *Liderazgo práctico en el control de pérdidas*. (Instituto de Seguridad del trabajo, Ed.). Loganville, Georgia.
- Church, R., & Reville, C. (1974). The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association*, 32, 101–118. Retrieved from http://www.geog.ucsb.edu/~forest/G294download/MAX_COVER_RLC_CSR.pdf
- Coello, C., Lamont, G., & Van Veldhuizen, D. (2007). *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems* (2nd ed.). New York: Springer Science+ Business Media.

- Correa, R. (2015). *Metodología para Mejorar la Seguridad Vial en Carreteras Mediante el Uso de Sistemas de Información Geográfica, Tramo México – Toluca (Tesis de Maestría)*. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Daskin, M. S. (1995). *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*. New York: Wiley Interscience.
- Drezner, T., & Drezner, Z. (2014). The maximin gradual cover location problem. *OR Spectrum*, 36(4), 903–921. <http://doi.org/10.1007/s00291-013-0350-7>
- Ehrgott, M. (2005). *Multicriteria Optimization*. Springer (2nd ed.). Berlin.
- Eisenberg, M., Bergner, L., & Hallstrom, A. (1979). Cardiac resuscitation in the community. Importance of rapid provision and implications for program planning. *JAMA*, 241(18), 1905–1907.
- Esri. (2016). What is GIS? Retrieved from <http://www.esri.com/what-is-gis>
- Farahani, R. Z., Asgari, N., Heidari, N., Hosseini, M., & Goh, M. (2012). Covering problems in facility location: A review. *Computers and Industrial Engineering*, 62(1), 368–407. <http://doi.org/10.1016/j.cie.2011.08.020>
- Farahani, R. Z., Hekmatfar, M., Fahimnia, B., & Kazemzadeh, N. (2014). Hierarchical facility location problem: Models, classifications, techniques, and applications. *Computers and Industrial Engineering*, 68(1), 104–117. <http://doi.org/10.1016/j.cie.2013.12.005>
- Fazel Zarandi, M. H., Davari, S., & Haddad Sisakht, S. A. (2011). The large scale maximal covering location problem. *Scientia Iranica*, 18(6), 1564–1570. <http://doi.org/10.1016/j.scient.2011.11.008>
- Felder, S., & Brinkmann, H. (2002). Spatial allocation of emergency medical services: minimising the death rate or providing equal access? *Regional Science and Urban Economics*, 32(1), 27–45. [http://doi.org/10.1016/S0166-0462\(01\)00074-6](http://doi.org/10.1016/S0166-0462(01)00074-6)
- GAMS. (2016). México: Versión 24.7.1, Licencia académica.
- Gendreau, M., Laporte, G., & Semet, F. (2001). A dynamic model and parallel tabu search heuristic for real-time ambulance relocation. *Parallel Computing*, 27(12), 1641–1653. [http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8191\(01\)00103-X](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8191(01)00103-X)
- Gendreau, M., Laporte, G., & Semet, F. (2006). The maximal expected coverage relocation problem for emergency vehicles. *Journal of the Operational Research Society*, 57(1), 22–28. <http://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601991>
- Gobierno del Estado de Morelos. (2012). *Estudio de movilidad urbana de la zona metropolitana de Cuernavaca*. Retrieved from [http://obum.zmCuernavaca.morelos.gob.mx/proyectos/Informe_ejecutivo MovilidadU.pdf](http://obum.zmCuernavaca.morelos.gob.mx/proyectos/Informe_ejecutivo_MovilidadU.pdf)

- González, E. E. (2013). *Una Propuesta para la Localización de los Servicios de Emergencia en la Autopista México-Querétaro (Tesis de Maestría)*. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Gutiérrez de MacGregor, M. T. (2003). Desarrollo y distribución de la población urbana en México. *Investigaciones Geográficas*, 50, 77–91. Retrieved from <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rig/article/view/30433/28254>
- Harvey, J. C. (1974). The Emergency Medical Service Systems Act of 1973. *JAMA*, 230(8), 1139–1140. <http://doi.org/10.1001/jama.1974.03240080021019>
- Hills, P. J., & Jones-Lee, M. W. (1983). The role of safety in highway investment appraisal for developing countries. *Accident Analysis & Prevention*, 15(5), 355–369. [http://doi.org/10.1016/0001-4575\(83\)90014-3](http://doi.org/10.1016/0001-4575(83)90014-3)
- INEGI. (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Retrieved January 15, 2016, from <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/17/17007.pdf>
- INEGI. (2013). Marco Geoestadístico Nacional. Retrieved August 15, 2016, from http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico.aspx
- INEGI. (2014a). Principales causas de mortalidad. Retrieved September 12, 2015, from <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/registros/vitales/mortalidad/tabulados/ConsultaMortalidad.asp>
- INEGI. (2014b). Sistemas de Información Geográfica. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/internet/sistemainformaciongeografica.pdf>
- INEGI. (2015). Accidentes de tránsito terrestre en zonas urbanas y suburbanas. Retrieved November 25, 2015, from <http://sc.inegi.org.mx/cobdem/contenido.jsp>
- Johnson, A. (2011). Eran las teorías de Heinrich válidas, y siguen siendo importantes? Retrieved April 20, 2015, from <http://www.safetyandhealthmagazine.com/articles/6368-examining-the-foundation>
- Karatas, M., Razi, N., & Tozan, H. (2016). A Comparison of p-median and Maximal Coverage Location Models with Q–coverage Requirement. *Procedia Engineering*, 149, 169–176. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.652>
- Klose, A., & Drexl, A. (2005). Facility location models for distribution system design. *European Journal of Operational Research*, 162(1), 4–29. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.10.031>
- Lam, S. S. W., Nguyen, F. N. H. L., Ng, Y. Y., Lee, V. P.-X., Wong, T. H., Fook-Chong, S. M. C., & Ong, M. E. H. (2015). Factors affecting the ambulance response times of trauma incidents in Singapore. *Accident Analysis &*

Prevention, 82, 27–35. <http://doi.org/10.1016/j.aap.2015.05.007>

Li, Xueping; Zhao, Zhaoxia; Zhu, Xiaoyan; Wyatt, T. (2011). Covering models and optimization techniques for emergency response facility location and planning: a review. *Mathematical Methods of Operations Research*, 281–310. <http://doi.org/10.1007/s00186-011-0363-4>

Luna, L., & Chías, L. (1999). El uso de SIG en el análisis de la distribución de accidentes en carreteras: el caso de Tamaulipas, México. *Investigaciones Geográficas*. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n40/n40a11.pdf>

Mahmud, A. R., & Indriasari, V. (2009). Facility Location Models Development To Maximize Total Service Area. *Theoretical and Empirical Researches in Urban Managemen*. Retrieved from <https://ideas.repec.org/a/rom/terumm/v4y2009i1sp87-100.html>

Mandell, M. B. (1998). Covering models for two-tiered emergency medical services systems. *Location Science*, 355–368.

Mendoza, A., Gutiérrez, J. L., & Cadengo, M. (2013). *Siniestralidad vial de carreteras en áreas urbanas, caso: Autopista Cuernavaca- Acapulco*. Querétaro. Retrieved from <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt378.pdf>

OMS. (2014). Las 10 causas principales de defunción en el mundo. Retrieved August 1, 2015, from <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs310/es/>

OMS. (2015). *Informe Sobre la Situación Mundial de la Seguridad Vial 2015*. Ginebra. Retrieved from http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_traffic/es/

Osyczka, A. (1985). *Multicriteria optimization for engineering design*. (I. J. S. Gero, Ed.), *Design optimization*. New York: Academic Press, Inc.

Pardillo Mayora, J. (2004). *Procedimientos de estudio, diseño y gestión de medidas de seguridad vial en las infraestructuras*. Madrid, España.

Pérez-Núñez, R., Avila-Burgos, L., Híjar-Medina, M., Pelcastre-Villafuerte, B., Celis, A., & Salinas-Rodríguez, A. (2011). Economic impact of fatal and non-fatal road traffic injuries in Guadalajara Metropolitan Area and Jalisco, Mexico. *Injury Prevention : Journal of the International Society for Child and Adolescent Injury Prevention*, 17(5), 297–303. <http://doi.org/10.1136/ip.2010.027995>

Picado, G., & Aguero, J. (2016). Emergency Response Times and Crash Risk: An Analysis Framework for Costa Rica. *Journal of Transport & Health*, 3(2), S38–S39.

Pons, P. T., Haukoos, J. S., Bludworth, W., Cribley, T., Pons, K. A., & Markovchick, V. J. (2005). Paramedic response time: does it affect patient survival? *Acad. Emergency Med.*, 12(7), 594–600.

Radelat, G. (2003). *Principios de Ingeniería de Tránsito (ITE)*. Washington D.C.:

ITE.

- Ramos, A., Sánchez, P., Ferrer, J. M., Barquín, J., & Linares, P. (2010). *Modelos matemáticos de optimización*. Universidad Pontificia Comillas. Madrid, España. Retrieved from https://www.gams.com/docs/contributed/modelado_en_gams.pdf
- Real Academia Española. (2016). Diccionario de la lengua española. Retrieved January 28, 2016, from <http://dle.rae.es/?id=0KUeoUu>
- Rodríguez, D. E. (2012). *Localización de servicios de auxilio vial en carreteras, estudio de caso: Autopista México – Puebla (Tesis de Licenciatura)*. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Şahin, G., Süral, H., & Meral, S. (2007). Locational analysis for regionalization of Turkish Red Crescent blood services. *Computers & Operations Research*, 34(3), 692–704. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.020>
- Sánchez-Mangas, R., García-Ferrrer, A., De Juan, A., & Arroyo, A. M. (2010). The probability of death in road traffic accidents. How important is a quick medical response? *Accident Analysis and Prevention*, 42(4), 1048–1056. <http://doi.org/10.1016/j.aap.2009.12.012>
- Schilling, D. A., Jayaraman, V., & Barkhi, R. (1993). A review of covering problem in facility location. *Location Science*, 1(1), 25–55.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2012). *Acciones para el Fortalecimiento de la Seguridad Vial*. México. Retrieved from http://www.sct.gob.mx/fileadmin/ajardon/Material/Acciones_Seguridad_Vial.pdf
- Secretaría de Salud. (2015). Accidentes viales, segunda causa de muerte en México. Retrieved November 9, 2015, from <http://www.gob.mx/salud/articulos/accidentes-viales-segunda-causa-de-muerte-en-mexico>
- STCONAPRA. (2016). Atención prehospitalaria de urgencias médicas. Retrieved October 17, 2016, from http://conapra.salud.gob.mx/Interior/Atencion_Prehospitalaria.html
- Tomlinson, R. (2013). *Thinking About GIS*. (ESRI PRESS, Ed.) (5th ed.). Retrieved from <http://esripress.esri.com/storage/esripress/images/241/133842-tagis5-samplechapter.pdf>
- Toran, A., & Long, W. (2012). The Role of Geographic Information Systems (GIS) in Road Emergency Services Location and Black Spot Studies. In *Australasian Transport Research Forum (ATRF)* (pp. 1–10). Perth, Australia. Retrieved from http://atrf.info/papers/2012/2012_toranpour_yue.pdf
- Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., & Bergman, L. (1971). The Location of Emergency Service Facilities. *Operations Research*, 19(6), 1363–1373. <http://doi.org/10.1287/opre.19.6.1363>

- TransCAD. (2002). Versión 4.5, Licencia academica.
- Trunkey, D. D. (1983). Accidental and intentional injuries account for more years of life lost in the U. S. than cancer and heart disease. Among the prescribed remedies are improved preventive efforts, speedier surgery and further research. *Scientific American*, 249(2), 28–35. Retrieved from <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0020804913&origin=inward&txGid=0>
- UNAM IIG ; Secretaria de Salud. (2009). *Diagnóstico espacial de los accidentes de tránsito en el Distrito Federal*. (I. ; G. F. UNAM, Ed.). México. Retrieved from http://conapra.salud.gob.mx/Interior/Documentos/Publicaciones_Especializadas/Diagnostico_Espacial_Accidentes_DF.pdf
- UNICEF. (2012). *Estado Mundial de la Infancia 2012*. Nueva York. Retrieved from [http://www.unicef.org/republicadominicana/SOWC_2012-Main_Report_SP\(1\).pdf](http://www.unicef.org/republicadominicana/SOWC_2012-Main_Report_SP(1).pdf)
- Whetten, N. L. (1948). *Rural Mexico*. The University of Chicago Press.
- Yenisey, M. M., & Yagmahan, B. (2014). Multi-objective permutation flow shop scheduling problem: Literature review, classification and current trends. *Omega*, 45, 119–135. <http://doi.org/10.1016/j.omega.2013.07.004>
- Zamora, D. (2015). *Metodología para la Localización de Servicios de Emergencia, Caso México-Toluca (Tesis de Maestría)*. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.