



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

**UNA PROPUESTA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LOS SERVICIOS DE
EMERGENCIA EN LA AUTOPISTA MÉXICO-QUERÉTARO**

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

PRESENTA:
ELIA ERANDI GONZÁLEZ MIRANDA

TUTORES PRINCIPALES
RICARDO, ACEVES, GARCÍA, FACULTAD DE INGENIERÍA
HÉCTOR DANIEL, RESÉNDIZ, LÓPEZ, INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

MÉXICO, D. F. FEBRERO 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Luis Chías Becerril
Secretario: M. I. Héctor Reséndiz López
Vocal: Dr. Ricardo Aceves García
1^{er.} Suplente: Dra. Idalia Flores de la Mota
2^{d o.} Suplente: M. I. José Antonio Rivera Colmenero

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, México D.F.

TUTORES DE TESIS:

RICARDO ACEVES GARCÍA

HÉCTOR D. RESÉNDIZ LÓPEZ

FIRMA

FIRMA

Con cariño y gratitud a mis padres, hermanos y amigos

Agradecimientos

Al Dr. Ricardo Aceves García y al M. I Héctor Reséndiz López por su tiempo y dedicación para dirigir este trabajo.

A los sinodales por los comentarios y sugerencias que enriquecieron esta tesis.

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

A mi familia, amigos, profesores del Posgrado de Ingeniería y de CIMAT por motivarme a realizar este proyecto.

A la familia Flores Choperena por su apoyo incondicional durante la elaboración de este proyecto.

A todos, muchas gracias.

Índice general

Índice de tablas.....	6
Índice de figuras.....	7
Resumen.....	8
Introducción.....	9
Capítulo 1. Los servicios de atención a emergencias en las carreteras de peaje .	11
1.1 Definición de Emergencia y Servicio de atención a Emergencias	11
1.2 Accidentes de tránsito en carreteras	15
1.3 Situación México Tramo México-Querétaro	24
1.4 Medidas reactivas y preventivas	26
1.5 Paradigmas del tiempo de respuesta; hora de oro o tiempo cero	29
1.6 Ubicación de servicios de emergencia en la autopista México-Querétaro .	31
Capítulo 2. Metodología general de los modelos de Investigación de Operaciones	34
2.1 Clasificación de los Problemas de Optimización.....	38
2.2 Teoría de Localización	41
2.3 Modelos de localización de servicios	43
2.4 Conceptos básicos de los Sistemas de Información Geográfica	45
Capítulo 3. Definición del modelo de análisis.....	49
3.1 Modelo Maximal Service Area Problem (MSAP).....	49
3.2 Justificación del uso del modelo	52
3.3 Criterios de elección del modelo	53
3.4 Resultados del diagnóstico de la autopista México-Querétaro.....	57
Capítulo 4. Aplicación y Resultados.....	64
4.1 Aplicación del modelo MSAP al tramo carretero México-Querétaro	64
4.2 Resultados.....	68
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.....	72
Siglas y Abreviaturas.....	73

Anexos.....	74
Referencias.....	79

Índice de tablas

Tabla 1 Instituciones educativas que otorgan el título de técnico en urgencias médicas en México.....	14
Tabla 2 Principales causas de los accidentes de tránsito en la autopista México-Querétaro en el año 2000	19
Tabla 3 Acciones en la Autopista México - Querétaro para prevenir accidentes de tránsito.....	25
Tabla 4 Ubicación de los Servicios Médicos de Emergencia en la autopista México - Querétaro	31
Tabla 5 Clasificación de los problemas de localización de servicios.....	42
Tabla 6 Capas de análisis para la autopista México - Querétaro	53
Tabla 7 Matriz de impacto cruzado	55
Tabla 8 Cobertura de los Servicios Médicos de Emergencias actuales, autopista México-Querétaro	68
Tabla 9 Cobertura de la propuesta de los Servicios Médicos de Emergencias, autopista México-Querétaro	69

Índice de figuras

Figura 1 Resultados de la encuesta: “Números de teléfonos empleados para acceder a los Servicios Médicos de Emergencia en México”	15
Figura 2 “Problemas que ocasionan los accidentes de tránsito”	16
Figura 3 Matriz de Haddon para el análisis de los accidentes de tránsito en carreteras.....	28
Figura 4 Diagrama del proceso de evaluación de las llamadas de emergencia	32
Figura 5 Mapa de la red carretera de México	33
Figura 6 Metodología general de la Investigación de Operaciones	35
Figura 7 Metodología para los problemas de optimización.....	36
Figura 8 Proceso de solución de problemas desde el enfoque de la I. de O.	37
Figura 9 Capas temáticas para representar datos en un SIG.....	48
Figura 10 Impedancia en minutos para los SME Palmillas y San Francisco	57
Figura 11 Cobertura de la autopista México-Querétaro desde el SME Palmillas ...	58
Figura 12 Cobertura de la autopista México-Querétaro desde el SME San Francisco	59
Figura 13 Impedancia en minutos para SME Tepotzotlán	60
Figura 14 Cobertura de la autopista México-Querétaro desde el SME Tepotzotlán	61
Figura 15 Impedancia en minutos de los tres SME en la autopista México-Querétaro	62
Figura 16 Cantidad de tramos cubiertos por los SME ubicados en la autopista México-Querétaro.....	70
Figura 17 Cantidad de tramos cubiertos por la ubicación propuestos de los SME en la autopista México-Querétaro	71

Resumen

La siguiente investigación muestra cómo el uso de la programación entera y los sistemas de información geográfica (SIG) son de gran utilidad para la modelación en los problemas de localización de servicios de emergencia a lo largo de un tramo carretero. La importancia y ventajas de usar las tecnologías de la información como los SIG, sin duda, abren nuevos enfoques para la toma de decisiones en problemas de este estilo. Se realizó una búsqueda en literatura especializada para conocer la importancia de las lesiones y traumatismos ocasionados por los accidentes de tránsito a nivel mundial y nacional, los tipos de servicios de emergencia que existen, el proceso de atención de las llamadas de emergencia en carreteras, la situación actual de los paramédicos que laboran en las ambulancias y los tipos de modelos de localización de servicios que han sido utilizados en los últimos cinco años. Con datos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) se detectó que, en el Estado de México y Querétaro ocurre una importante cantidad de accidentes y costos derivados de éstos, por lo que se obtuvo información acerca de accidentes de tránsito y servicios de emergencia en la autopista México-Querétaro y se analizó para su representación espacial y elaboración del diagnóstico de la situación actual. Se aplicó el modelo Maximal Service Average Problem (MSAP) desarrollado por Vini Idriasari et al en 2010 [1] modificando algunos parámetros; uno de ellos, genera áreas de servicio (tramos de la carretera que está más cerca de un servicio de emergencia que a otro ya sea en tiempo, costo o distancia) usando herramienta de un SIG, el problema se resolvió con el software LINGO versión 13 y los resultados así como las tablas de datos, mapas y conclusiones se muestran a lo largo de este documento.

El objetivo de esta investigación es: aplicar un modelo de localización de servicios para minimizar los tiempos de respuesta de **las ambulancias** en un tramo de la carretera México - Querétaro.

Introducción

Los accidentes viales en las autopistas causan miles de muertes cada año a nivel mundial [2, 3]. Por esta razón, la Organización Mundial de la Salud (OMS) desde hace varios años los considera como un problema de salud pública [2]. En México, de acuerdo con el Programa Nacional de Salud 2007-2012, los accidentes de tránsito son la séptima causa de muerte en hombres y la décimo quinta en mujeres [4]. Los servicios de atención a emergencia en carreteras juegan un papel importante en la disminución de las tasas de mortandad, ya que la mayoría de las muertes están relacionadas con las lesiones provocadas por accidentes de tránsito [5]. En la presente investigación se propone la aplicación de un modelo de cobertura que utiliza sistemas de información geográfica cuyo objetivo es obtener las ubicaciones óptimas de los servicios de emergencia a lo largo del tramo carretero México-Querétaro.

En el capítulo uno, se destaca la importancia de atención a los accidentes de tránsito, como un problema de carácter social, se muestran cifras de las estadísticas de varios países entre los que se encuentra México, también se proporcionan medidas, planes y programas que se han implementado como medidas de prevención y de reacción en cuanto a este problema. La importancia del tiempo de respuesta de los servicios de emergencia y algunos estándares del tiempo que se recomienda para que las víctimas no sufran de traumatismos irreversibles.

En el capítulo dos, se hace una descripción de modelos matemáticos, de localización de servicios, que se han utilizado para resolver este tipo de problema y el uso de los Sistemas de Información Geográfica como herramienta de análisis. Se describen los más importantes y se muestra el modelo que será utilizado; Maximal Service Average Problem MSAP, así como los criterios de selección del mismo.

El capítulo tres, contiene la descripción del modelo MSAP, con detalles de las modificaciones en los parámetros que se realizaron. Se justifica la selección del mode-

lo y la elección de las variables. Los resultados del diagnóstico de la autopista México-Querétaro se encuentran al final de este apartado.

El capítulo cuatro, presenta el análisis de los resultados y las conclusiones de esta investigación, con detalles de las modificaciones que se realizaron al modelo original MSAP. Los resultados que arrojó el modelo se presentan por medio de mapas, graficas y tablas.

En el capítulo cinco, se dan las conclusiones y recomendaciones a partir de los resultados que arrojaron el modelo y el análisis de los mismos.

Los anexos, contienen los mapas de la autopista México - Querétaro que fueron elaborados durante el proceso de esta investigación. También puede consultarse el índice de tablas y figuras al inicio del documento.

Capítulo 1. Los servicios de atención a emergencias en las carreteras de peaje

En este capítulo se abordarán los temas de emergencias y sus servicios de atención con particular énfasis en el tema de accidentes en carretera. Se muestra cómo operan los servicios de emergencia en carreteras de peaje, así como información relevante acerca de las actividades de los paramédicos. La importancia de la atención pre-hospitalaria y el tiempo de respuesta de los servicios de emergencia como medidas reactivas en el tema de accidentes de tránsito.

1.1 Definición de Emergencia y Servicio de atención a Emergencias

De acuerdo con la Real Academia Española (RAE), una emergencia es: “una situación de peligro o desastre que requiere una acción inmediata” [6].

En general, las emergencias y los tipos de servicios para la atención de éstas, dependen de la naturaleza y magnitud del evento. Existen, por ejemplo, servicios de atención médica, policiaca, bomberos, protección civil y también la combinación de algunos de ellos para eventos específicos; como emergencias sanitarias, desastres naturales, accidentes de tránsito, situaciones de caos, por mencionar algunos.

En particular, un servicio médico de atención a emergencias tiene tres propósitos principales: evitar las muertes prematuras, reducir el sufrimiento y prevenir traumatismos o discapacidades permanentes [7, 8]. Para las víctimas de cualquier tipo de accidente, el tiempo de respuesta, es decir, el tiempo que transcurre desde que se da aviso al servicio de emergencia hasta que este llega al lugar del siniestro, es fundamental. En un accidente de tránsito, es necesario que el tiempo de arribo de las ambulancias o servicios médicos sea mínimo para la pronta atención de las víctimas, sin embargo, en algunos casos el acceso de las ambulancias o unidades de

rescate al lugar del siniestro es imposible, por no haber retornos inmediatos en las carreteras.

También existen argumentos de diversas investigaciones que consideran, al tiempo de respuesta, como un factor importante en la atención de víctimas de accidentes de tránsito; para Ali et al [8]:

El tiempo de respuesta, la calidad de la supervisión médica y el tratamiento de los pacientes son factores críticos que determinan:

- 1) el número de vidas que pueden ser salvadas y
- 2) la calidad de vida de los sobrevivientes

Por otra parte, Stefan Felder y Henrik Brinkmann [7] consideran que:

El tiempo de respuesta es un factor crítico para las pacientes de emergencias ya que determina en gran medida el número de vidas que pueden ser salvadas, así como la calidad de vida de aquellos que sobreviven.

Existen además, en la literatura especializada, diversas investigaciones acerca de la importancia del tiempo de respuesta en los servicios médicos de emergencias, podemos mencionar los estudios de Ali M et al, Blackwell H. et al, Brodsky, Felder et al, González et al, Lira Villavicencio et al. [7-13]; incluso, en el trabajo realizado por Sánchez-Mangas et al se muestran los resultados de la relación que existe entre el tiempo de respuesta de los servicios de emergencia y la probabilidad de muerte en accidentes de tránsito, los cuales muestran que una diferencia de diez minutos en la atención de emergencia, reduce estadísticamente las muertes en carreteras [14].

Otro factor clave para la atención de emergencias es el tipo de modelo de atención a emergencias, en el mundo, existen dos: el Anglo-Americano y el Franco-Alemán. De acuerdo con Jeffrey L. Arnold [15], en el modelo Anglo-Americano, los pacientes son llevados al hospital de atención a emergencias siendo los paramédicos o técnicos en urgencias médicas los encargados de dar a las víctimas la primera aten-

ción. Mientras en el modelo Franco-Alemán los médicos y la tecnología son llevadas al lugar del siniestro con el propósito de proveer un nivel más alto de atención de emergencia antes de que las víctimas sean trasladadas a un hospital. La diferencia entonces es que, mientras en el modelo Anglo-Americano los paramédicos son los que dan atención a las víctimas, en el Franco-Alemán son médicos.

En México, el modelo de atención a emergencias es muy parecido al Anglo-Americano, es decir, las víctimas que requieren atención médica de urgencia son llevadas a los hospitales, y hasta entonces los primeros servicios médicos que reciben son los que les proporcionan los paramédicos o técnicos en urgencias médicas. Por lo que el paramédico juega un papel de suma importancia en el servicio médico de emergencia.

Para iniciar el tema de los técnicos en urgencias médicas (TUM) o paramédicos mostraremos los resultados obtenidos en la investigación de Fraga-Sastrías del año 2010, la cual analiza la situación en México de los TUM y en la cual, se señala que, la mayor parte del personal que se encarga de brindar atención en los sistemas médicos de emergencia son jóvenes con una experiencia de cinco años en promedio. Lo anterior responde a muchos factores, entre los cuales destaca el hecho de que en nuestro país la educación que reciben los técnicos de urgencias médicas es insuficiente; de acuerdo con Fraga-Sastrías et al [16] *“la mayor parte de los técnicos en México (refiriéndose a los TUM) tiene niveles de entrenamiento equivalentes a nivel básico o menor”*, en ese mismo artículo se enuncian las universidades que otorgan el título de Técnico Superior Universitario (TSU) y que son aprobados por la Secretaría de Educación Pública, las cuales son:

Universidad	Título que otorga
Universidad de Guadalajara	TSU en emergencias, seguridad ocupacional y rescate
Universidad Tecnológica de Aguascalientes y Hermosillo	TSU paramédico
Universidad privada en Puebla	TSU en emergencias médicas y desastres
Colegio Latino-americano de Educación Avanzada	TSU paramédico por medio de un programa de educación a distancia

Tabla 1 Instituciones educativas que otorgan el título de técnico en urgencias médicas en México

Fuente: Elaboración propia. Basada en el artículo de Fraga-Sastrías, et al. [16]

Se ha mencionado la importancia del tiempo de respuesta y el personal encargado de brindar el servicio de atención a emergencias, que en general son paramédicos y técnicos en servicio de urgencias, sin embargo, existen otros factores clave en el servicio de atención a emergencias como es el medio de comunicación para que las víctimas o espectadores de los siniestros soliciten dichos servicios. Mencionaremos el caso de México, basándonos en la información reportada en el estudio de Fraga-Sastrías et al [16], la cual recopila los números de contacto para diferentes organizaciones encargadas de brindar el servicio de atención a emergencias, el reporte está basado en una encuesta del año 2007. A continuación se muestran gráficamente los resultados, reportados en el estudio.

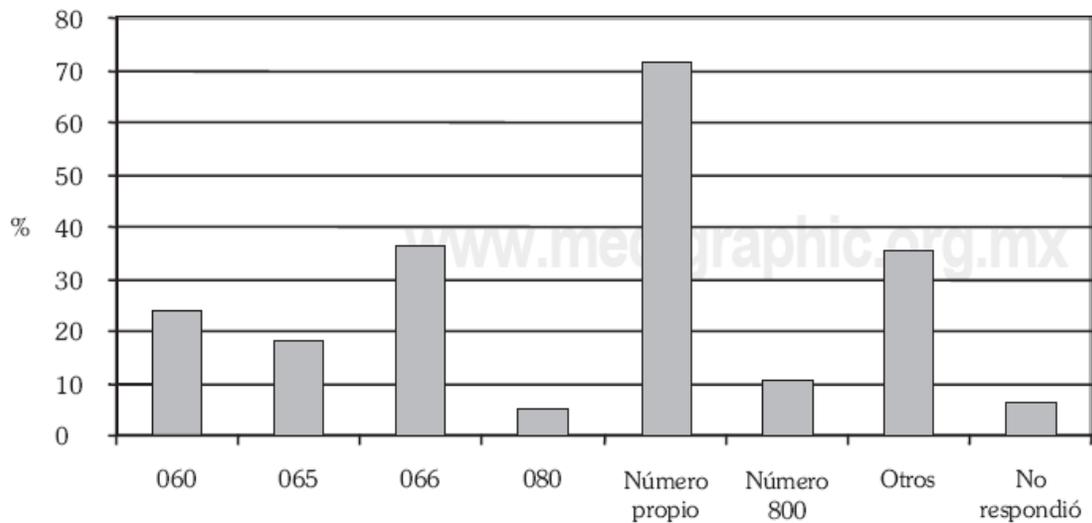


Figura 1 Resultados de la encuesta: “Números de teléfonos empleados para acceder a los Servicios Médicos de Emergencia en México”

Fuente: Del artículo de Fraga-Sastrías et al [16]

En resumen, es importante brindar atención efectiva (en tiempo, con el personal capacitado y los instrumentos necesarios) a las víctimas de accidentes de tránsito para: reducir el número de lesiones y fatalidades, los gastos directos e indirectos. Como consecuencia, se debe fomentar el uso de buenas conductas y de respeto a las medidas de seguridad y prevención de accidentes. Aunque existen medios de acceso a los servicios médicos de emergencia, es necesario unificar y mejorar el tipo de servicio para que las víctimas de los siniestros puedan recibir una mejor y pronta atención.

1.2 Accidentes de tránsito en carreteras

Un accidente es un evento inesperado que es ocasionado por fuerzas externas. Para Luna González [17]: el accidente de tránsito vehicular es una ocurrencia que tiene espacio temporalidad y que resulta del efecto que causan personas y vehículos en movimiento, cuando éstos comparten un espacio geográfico. Es decir, se requiere la

participación, de por lo menos, un vehículo en movimiento cuyo control está a cargo de un conductor que, posibilita el desplazamiento de su vehículo dentro de los límites impuestos por la infraestructura, reglamentaciones y la presencia de otros en la vía. [17] Los accidentes pueden condicionar la necesidad de asistencia médica.

Particularmente, los accidentes viales en autopistas causan además de miles de muertes al año a nivel mundial un considerable número de discapacitados y daños materiales[2, 3]. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), a nivel mundial, 1.3 millones de personas fallecen como consecuencia de los accidentes de tránsito, de estas cifras, se estima que 3000 defunciones ocurren diariamente y también que más de la mitad de las víctimas no viajaban en automóvil (peatones). Pero no solo brindar pronta atención a las víctimas es importante, sino también asistir al medio físico donde ocurrió el siniestro ya que en ocasiones los señalamientos, asfalto u otros objetos son dañados provocando el mal estado de la carretera.

En la **Figura 2**, se ilustra los problemas que ocasionan los accidentes de tránsito de acuerdo con lo reportado en la tesis de licenciatura de Ricardez Cabrera [18].

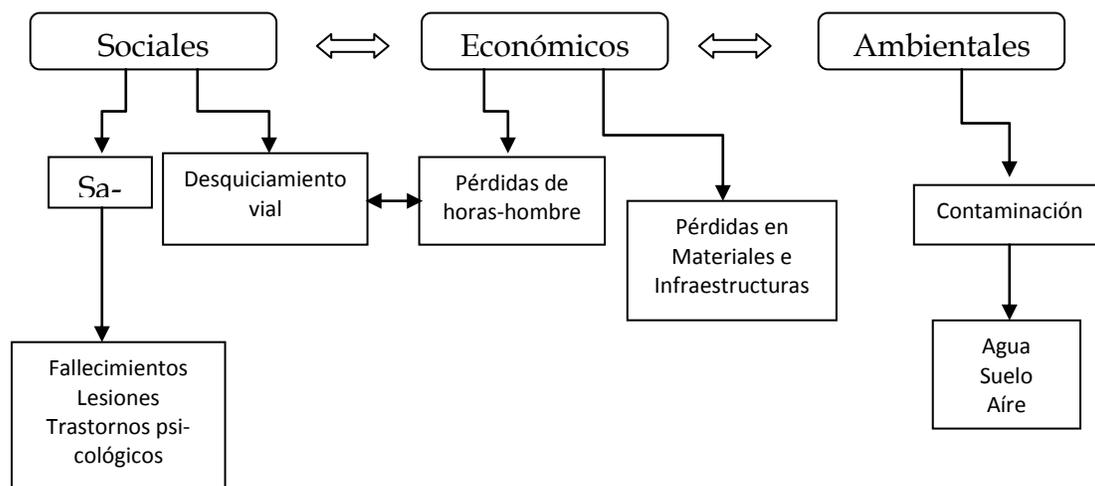


Figura 2 “Problemas que ocasionan los accidentes de tránsito”

Fuente: Ricardez Cabrera [19]

En España, de acuerdo con Sánchez-Mangas et al [14], 3000 accidentes de tránsito ocurren anualmente. En Pakistán las lesiones por accidentes de tránsito son la segunda causa de discapacidad y la onceava en causas por muerte prematura [8]. El caso de México no es diferente; de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) [20], en el periodo comprendido entre los años 1997 al 2009 se registraron en promedio 387,299 (trescientos ochenta y siete mil doscientos noventa y nueve) accidentes de tránsito terrestres en zonas urbanas y suburbanas.

De acuerdo con datos del Instituto de Seguros para la Seguridad en Carreteras, (por sus siglas en inglés: Insurance Institute for Highway Safety) [21], en Estados Unidos, 33,808 personas murieron por accidentes de tránsito en el año 2009, los costos monetarios, reportados por dicho instituto, exceden a los 200 billones de dólares anuales. Entre las conductas de los conductores que ocasionan la muerte en accidentes de tránsito están: alcoholismo, exceso velocidad, no uso del cinturón de seguridad, entre otras conductas peligrosas. En el Reino Unido, de acuerdo con Clarke et al [22], el Departamento de Transporte reportó que: los accidentes de tránsito provocaron 3000 muertes al año.

Para organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Panamericana de la Salud (OPS) el tema de los accidentes de tránsito, desde hace varios años, es un problema de salud mundial [23]. Existen diversos factores que pueden provocar un accidente de tránsito, podemos mencionar:

Factor social: En países en vías de desarrollo como México, hace falta generar más y mejores políticas que regulen: acciones para proteger a peatones y ciclistas, buena conductas al conducir un vehículo o expedición de licencias para conducir. Es importante destacar que en el país no existe un organismo que sea responsable por las víctimas de accidentes en carreteras. Instituciones como: SCT, INEGI, PGR, CAPUFE sólo reportan cifras y estadísticas acerca de los siniestros, y víctimas pero no existe un órgano de control que regule las políticas de tránsito vial. Es la OMS quien promueve y recomienda acciones en materia de prevención de accidentes.

Factor humano: Se refiere a la influencia del conductor en los vehículos, los cuales pueden ocasionar, por algunos estados físicos accidentes de tránsito, entre los estados más comunes de los conductores están: estado ético, influencia de algún medicamento o droga, distracción (por algún dispositivo móvil), inexperiencia al volante, exceso de velocidad, enfermedad neuronal, fatiga, cansancio (existen investigaciones acerca de enfermedades del sueño, control médico y estrés, que posibilitan el riesgo de sufrir accidentes de tránsito, aunque no es propósito de esta investigación ahondar en el tema, pueden consultarse: [24, 25])

Para especialistas como Chías Becerril [26], el factor humano ha sido sustituido por el factor social, término que se refiere al contexto social de los conductores en determinadas zonas geográficas. Por ejemplo, en ciertos lugares los conductores de camiones que transportan alimentos de un estado a otro están expuestos a jornadas largas de trabajo con muy pocas horas de descanso. De manera similar, los conductores de transportes urbanos, debido a la gran demanda de transportes, trabajan muchas horas los siete días de la semana, lo que provoca que al conducir en caminos y carreteras la mayoría de ellos manejen bajo la influencia de sustancias que afectan sus capacidades al volante.

Factor camino: Los caminos como toda infraestructura, requieren de mantenimiento constante, y más aún si las vías son utilizadas con mucha frecuencia por automóviles con carga pesada, además algunos accidentes de tránsito pueden provocar daños a los muros de contención, señalamientos o la carretera misma.

Factor agente natural: Se refiere a todo evento asociado con la naturaleza que ponga en peligro la vida de los usuarios de los caminos, por ejemplo: una mala visibilidad del camino (puede ser provocada por neblina, incendio, lluvia, etcétera), algún derrumbe o caída de un árbol que obstruya la vía, entre otros.

Factor vehículo: El buen estado de los vehículos es sin duda primordial para garantizar una disminución en los índices de accidentes de tránsito, desde una llanta en mal estado hasta una falla en el motor ha ocasionado accidentes mortales.

Tal y como lo muestra la **Tabla 2**, en el año 2000, el factor humano era la principal causa de accidentes de tránsito en la Autopista México-Querétaro.

Factor que causa el accidente	Accidentes
Factor humano	48,892
Factor camino	2,167
Factor agente natural	2,216
Factor vehículo	4,049
Total	57,324

Tabla 2 Principales causas de los accidentes de tránsito en la autopista México-Querétaro en el año 2000

Fuente: Espinoza Jiménez [27]

En este contexto, un tema de relevancia es el de la seguridad vial en carreteras. Para la Organización Mundial de la Salud la seguridad vial tiene especial atención en siete factores de riesgo, los cuales son:

1. Exceso de velocidad

En la mayoría de los caminos y carreteras del país existen señalamientos acerca de las velocidades permitidas para los usuarios de los mismos, sin embargo no en todos los casos se respetan, además actualmente los automóviles pueden alcanzar velocidades superiores a las permitidas por los caminos. De acuerdo con la ONU, reducir la velocidad un kilómetro puede disminuir las colisiones entre vehículos entre un 4% y 5%, además también protege más a los peatones.

2. Conducción bajo los efectos del alcohol

Ingerir bebidas alcohólicas es un detonante para sufrir accidentes en carretera, especialmente si se combina con algún medicamento u otra sustancia que afecte el buen estado del conductor. En algunos países el nivel de alcoholemia permitido para los jóvenes es más bajo que para los adultos.

3. Cinturones de seguridad

Estudios del Reino Unido, muestran que, en general, los jóvenes del sexo masculino, no utilizan cinturón de seguridad, y aunque no solo hombres si no población en general debe usar este dispositivo ya que puede salvar la vida en caso de un accidente de tránsito. Usarlo puede reducir el riesgo de cualquier tipo de traumatismos desde un 40% y hasta un 50% y en el caso de traumatismos fatales desde un 40% al 60%. [28].

4. Dispositivos de seguridad para niños

Cuando ocurre un accidente de tránsito es fundamental que, en especial, los niños pequeños y bebés estén asegurados a las sillas o dispositivos de seguridad ya que la

vulnerabilidad que presentan es muy alta. De acuerdo con datos de la ONU el índice de mortandad por traumatismos en bebés disminuye en un 71% y en niños pequeños en un 54%.

5. Uso de cascos

Para los conductores de vehículos de dos ruedas, como motocicletas, bicicletas y ciclomotores es fundamental que el uso del casco sea obligatorio ya que de esta manera se reducen los traumatismos craneoencefálicos así como muertes por colisiones con otros vehículos. Se ha estimado que el uso de cascos puede reducir los traumatismos craneoencefálicos hasta en un 70% [28].

6. Diseño e infraestructura de las carreteras

Separar el tipo de tránsito que circula por los caminos así como diseñar paso de peatones y vehículos de dos ruedas, mejorar la infraestructura en carreteras para disminuir la velocidad de los automóviles entre muchas otras medidas, puede ayudar a mejorar el tránsito de los vehículos, generando a su vez menor accidentes de tránsito.

7. Servicios de Emergencia

Debido a que los Servicios de Emergencia son vitales para salvar las vidas, se deben dar atención oportuna las víctimas antes de ser hospitalizadas y también rehabilitarlas para mejorar su calidad de vida.

Para el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) la seguridad vial comprende los siguientes puntos:

- Estudios sobre el factor humano
- Auditorias en seguridad vial
- Estudios de sitios de alta concentración de accidentes

- Análisis estadístico de siniestralidad
- Proyecto de señalamiento vial y dispositivos de seguridad
- Proyecto geométrico de carreteras: rampas de emergencia, distribuidores viales
- Proyecto de cruces ferrocarril-carretera [29].

Cada uno de los puntos anteriores comprende acciones para mejorar la seguridad vial en carreteras, por ejemplo: En los estudios del factor humano se centran en la educación vial, la capacitación de los conductores y las campañas de información. Las auditorías de seguridad vial estudian la infraestructura de los caminos para detectar posibles detonadores de accidentes. Los estudios de sitios de alta concentración de accidentes analizan, de acuerdo a la cantidad de eventos en un sitio, las posibles causas físicas y operativas que pudieran ocasionar más accidentes. El análisis estadístico de siniestralidad, es útil para los procesos estadísticos en diferentes escalas y niveles de agregación para identificar diversas variables involucradas en un accidente de tránsito (costo, número de víctimas, tramo...). El proyecto de señalamiento vial y dispositivos de seguridad inspecciona la red carretera de manera global para diseñar señalamientos y nuevos dispositivos de seguridad, cumpliendo con las normativas vigentes. El proyecto geométrico de carreteras, que se refiere a las rampas de emergencia y distribuidores viales, evalúa las condiciones actuales para proponer alternativas que mejoren el funcionamiento de la red carretera. El proyecto de cruces ferrocarril-carretera, ofrece asesoría para los tramos carreteros que tienen intersección con la red ferroviaria para la revisión del proyecto geométrico y el señalamiento para ambos modos del transporte.

En muchos casos, no se cuenta con la información necesaria para evaluar la magnitud del problema, por lo que es necesario recopilar datos acerca del evento, hacer un análisis en las principales vialidades que consideren factores como el crecimiento demográfico el aumento de vehículos, las condiciones de seguridad en los vehí-

culos, la educación de los conductores, la legislación de tránsito, las mejoras en caminos, entre otros.

De acuerdo con el total de víctimas que mueren debido a accidentes en carretera, el 57% fallecen minutos antes de que los servicios de emergencia lleguen al lugar del evento, es por ello que en países de la Unión Europea como: Austria, Bosnia, Herzegovina, Estonia y Alemania, Hungría, Letonia, Lituania, Eslovaquia y Suiza es obligatorio tomar cursos de primeros auxilios como parte de la educación al volante. En Finlandia una nueva propuesta permitiría a las víctimas reducir las fatalidades; se trata de un dispositivo electrónico instalado en los vehículos el cual envía información a una central, en caso de que el vehículo sufriera accidente, acerca de posición y tipo de suceso, también permitiría al conductor hablar con un asistente para solicitar otros servicios. En Alemania y Suiza, en carreteras congestionadas por el tráfico, los vehículos deben moverse hacia los laterales, abriendo un espacio intermedio entre ambos carriles, para que, en caso de ser requerido, el servicio de emergencia pueda circular y así dar atención a las víctimas de accidentes de tránsito. En Dinamarca, se ha implementado el sistema Franco-Alemán para los servicios de emergencia. En Holanda, Bélgica, Alemania y Austria se ha propuesto rescatar a las víctimas usando helicóptero. En España los servicios médicos incluyen apoyo psicológico para las víctimas, incluso para sus familiares y amigos.

1.3 Situación México Tramo México-Querétaro

En México, de acuerdo con el Programa Nacional de Salud 2007-20 [4] , los accidentes de tránsito son la séptima causa de muerte en hombres y la décimo quinta en mujeres [30]. Para la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Secretaría de Salud y Gobierno Federal se trata de un problema de salud pública y además es considerado como uno de los ejes prioritarios en planes y programas nacionales.

En este mismo sentido, los servicios de emergencia en carreteras juegan un papel importante en la disminución de las tasas de mortandad, ya que la mayoría de las muertes que ocurren en las carreteras están relacionadas con las lesiones provocadas por accidentes de tránsito [5].

En el contexto de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) las autopistas concesionadas por Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (CAPUFE) prestan servicios de atención a emergencias que comprenden la atención pre hospitalaria de accidentes de tránsito, sin embargo, no se justifica la ubicación de dichos servicios por lo que se supone se hace con base en la experiencia de los prestadores. Dichos servicios pueden ser solicitados a través del 074 o directamente en las casetas o puestos de recate del tramo carretero. CAPUFE es un organismo público descentralizado del Gobierno Federal con autonomía jurídica y es el encargado de la regulación de los servicios en distintas autopistas de cuota, de acuerdo a su sitio oficial, tiene 50 años de funcionamiento en el país [31].

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes pública a través de su sala de prensa, diversos comunicados acerca de las acciones y medidas para evaluar y mejorar el sistema de respuesta de los servicios médicos en las autopistas de CAPUFE, de manera general éstas se pueden agrupar en tres: Simulacros para evaluación de respuesta de los servicios médicos; operativos por temporadas vacacionales y fines de semana largos; refuerzo de los dispositivos en el servicio. La siguiente tabla muestra algunas de las acciones:

No. Comunicado	Fecha	Acción	Descripción
-----	-----	Participación coordinada con otras instituciones para atención de eventos específicos	CONAGUA, desalojo de agua negras
135	18/08/2010	Simulacro atención de emergencias para accidentes de tránsito en la autopista México-Querétaro	Representación de una coalición entre una pipa y cuatro autos compactos ocasionando un incendio que provoque otro accidente que involucre 25 víctimas
240	00/11/2009	Aumento de dispositivos para atender emergencias médicas así como en los señalamientos en las zonas de riesgo y suspensión de obras en las autopistas de CAPUFE	59 unidades de patrullaje permanente a lo largo de las autopistas, incremento en el personal de apoyo para tareas de abanderamiento. Además, dotará de mayor cantidad de moneda fraccionaria a los cajeros, para facilitar el cobro del peaje
127	12/07/2008	Operativos de seguridad por vacaciones de verano, invierno, fines de semana largo en los caminos y puentes de CAPUFE	Unidades de atención pre hospitalaria y ambulancias con auxilio médico, paramédicos capacitados y certificados, más de cien grúas, señalamientos y patrullas de atención ciudadana

Tabla 3 Acciones en la Autopista México - Querétaro para prevenir accidentes de tránsito

Fuente: Elaboración propia basada en información de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes [32]

El costo de los accidentes de tránsito para países en vías de desarrollo como México es del 1% al 3% en su Producto Interno Bruto (PIB) [33]. Es por ello que organismos como la OMS, OPS, Centro Nacional para la Prevención de Accidentes CENAPRA (IMESEVI), RAAC, SCT, Secretaria de Salud destinan recursos en medidas y accio-

nes que mitiguen la incidencia y aumento de dichas cifras. Algunas de estas medidas son:

1. *CENAPRA: Programas de capacitación de policías, auditorías de seguridad vial, programa alcoholimetría, guía para prevenir accidentes de tránsito*
2. *SCT: Programa Medicina preventiva*
3. *RAAC: Programas de fomento y participación ciudadana en el tema de seguridad vial*
4. *Secretaría de Salud: Programa de Acción Específico 2007-2010 "Seguridad Vial"*

La seguridad vial se ha convertido en un problema de salud mundial, que tiene efectos sociales, sanitarios, económicos, factores de riesgo y en la competitividad en general. Los servicios de atención a emergencias en accidentes de tránsito juegan un papel crucial en la disminución de lesiones permanentes de las víctimas. Para la OMS, los servicios de emergencia se encuentran en el lugar número ocho de diez aspectos relevantes respecto al tema de seguridad vial mundial [34]. En México, de acuerdo a la literatura especializada, consultada para esta investigación, no se han encontrado criterios ni metodologías por parte de los prestadores del servicio para la localización de dichos servicios en la atención de accidentes de tránsito en la autopista México- Querétaro, lo cual hace suponer que se realiza con base en la experiencia de los prestadores del servicio, sin considerar factores del entorno como el crecimiento de la población o la incidencia de los accidentes.

1.4 Medidas reactivas y preventivas

Las medidas que se pueden tomar en el tema de los accidentes de tránsito, se pueden clasificar en tres niveles:

- **Nivel primario:** Antes de la ocurrencia de los accidentes

- **Nivel secundario:** Donde se actúa con rapidez cuando suceden los siniestros
- **Nivel terciario:** Rehabilitación de las actividades en los dos niveles anteriores

Existe una herramienta que incluye los tres niveles de prevención, creada por William Haddon en 1970, y que es útil para detectar componentes y acciones a tomar en el tema de lesiones y accidentes, una versión de esta propuesta por la Organización Mundial de la Salud y modificada para propósitos de esta investigación se presenta a continuación:

	Humano	Vehículo	Camino / medio ambiente
Antes del evento	<p>No consumir bebidas alcohólicas</p> <p>Evitar el consumo algún medicamento que provoque cansancio, sueño, alteraciones nerviosas o de la vista</p> <p>Respetar señalamientos</p> <p>Utilizar el cinturón de seguridad</p> <p>Evitar el uso del celular o cigarro</p> <p>Revisar los sentidos del camino. Observar los carriles exclusivos del transporte público o de vehículos de dos ruedas</p>	<p>Revisar los faros y frenos y parabrisas</p> <p>Niveles de aceite, agua y gasolina sean suficientes</p> <p>Llanta de repuesto</p> <p>Caja de herramientas y triángulos de alerta</p>	<p>Señalamientos y avisos oportunos</p> <p>Diseño de camino; rampas de frenado, postes de auxilio carretero,</p>
Evento	<p>Verificar el buen funcionamiento de los sacos de aire</p>	<p>Diseño protector</p>	<p>Carril de absorción y contención de impacto</p>
Después del evento	<p>Alejarse del fuego o del camino (en caso de poner riesgo su vida)</p> <p>Si es posible colocar señalizaciones de emergencia</p> <p>Comunicación inmediata con los servicios de emergencia</p>	<p>Intermitentes</p>	<p>Servicios carreteros</p> <p>Facilidades en los caminos para el rescate</p>

Figura 3 Matriz de Haddon para el análisis de los accidentes de tránsito en carreteras

Fuente: Elaboración propia basada en el trabajo de Haddon William [35]

Las dos primeras medidas requieren de la participación multidisciplinaria de gobierno, sociedad, civil y organismos no gubernamentales; En México, algunas de las medidas preventivas son:

- Restricción de horario para la venta de bebidas alcohólicas
- Detección de conductores con alcoholemia positiva
- Programas de conductor designado

Sin embargo, también es necesario que los caminos se construyan con mayores escalas de seguridad vial y que el proceso de manufacturación de automóviles sea sometido a nuevas pruebas para garantizar la seguridad del conductor así como de los pasajeros. Además será necesario que los servicios de emergencia cuenten con mejoras tanto en equipo técnico como tecnológico y que la rehabilitación de las víctimas de accidentes de tránsito sea oportuna y de mejor calidad.

En países de la Unión Europea, existen diversos programas y medidas en cuanto a la prevención de accidentes de tránsito, por ejemplo: El programa de *Seguridad Sustentable* (Sustainable Safety) en Holanda [36], *Visión Cero* (Zero Visión) [37], *Programa de Acción Federal para una Mayor Seguridad Vial* (Federal Action Programme for Greater Road Safety) en Suiza [38], En Finlandia el programa TARVA (The Finnish TARVA programme), En Bélgica, el *Fondo para la Seguridad Vial* (The Belgian Road Safety Fund). También hay programas respecto a mejoras para la infraestructura de los caminos y de los vehículos.

1.5 Paradigmas del tiempo de respuesta; hora de oro o tiempo cero

Como se mencionó en párrafos anteriores, el tiempo de respuesta de los servicios de emergencia es fundamental para las víctimas de accidentes de tránsito, ese tiem-

po corresponde al intervalo de tiempo entre el aviso o llamada a los servicios de emergencia y el arribo de los mismos al siniestro.

Para reducir el tiempo de respuesta, se han propuesto estándares en diferentes escalas de análisis; nacionales, internacionales, por regiones o localidades [10]. En diversos estudios podemos encontrar datos acerca del tiempo óptimo para que los servicios de emergencia brinden atención a las víctimas [8-10]. Sin embargo para algunos autores como Blackwell y Kaufmanel existe incertidumbre al cuantificar los beneficios que se tienen al reducir el tiempo en accidentes de tránsito [10]. Actualmente es posible cuantificar distintas variables en diferentes escalas para un mismo territorio geográfico debido principalmente a las nuevas tecnologías y herramientas de análisis

Algunos de los estándares están basados en el concepto llamado “hora de oro” o “tiempo cero” el cual se refiere a la urgente necesidad de las víctimas de recibir atención hospitalaria para evitar futuras e irreversibles lesiones o traumatismos, este tiempo comprende los primeros 60 minutos después de que ocurre el siniestro. Por lo que no solo la atención pre hospitalaria, que pudiera brindar los servicios de emergencia, es importante, sino también los cuidados de especialistas en hospitales, ya que de acuerdo con algunas investigaciones [9], lesiones como la arritmia cardiaca requieren de atención casi inmediata para evitar la muerte repentina de la víctimas.

Desafortunadamente, aún no es posible que los servicios de emergencia lleguen al lugar del siniestro en los primeros minutos en que ocurre el accidente, además la ocurrencia de un accidente puede provocar otros. Por ejemplo: un automóvil inmóvil en un camino de alta velocidad podría ocasionar una carambola (colisión de automóviles en secuencia).

1.6 Ubicación de servicios de emergencia en la autopista México-Querétaro

Actualmente los servicios de emergencia en el tramo carretero México- Querétaro que inicia en la caseta de cobro Tepetzotlán en el Estado de México y finaliza en la intersección con el Bulevar Bernardo Quintana en la ciudad de Querétaro se encuentran como los describe la tabla 4, la distancia entre las unidades médicas es considerable; de Tepetzotlán a San Francisco de 49.9 km y de San Francisco a Palmillas de 55.9 km.

Ubicación	Tramo Carretero	KM	UNIDAD MÉDICA
Centro Norte Querétaro	México - Querétaro	43 +200	Tepetzotlán
		93 + 100	San Francisco
		148 + 000	Palmillas

Tabla 4 Ubicación de los Servicios Médicos de Emergencia en la autopista México - Querétaro

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes [32]

La atención de los servicios de emergencia en los tramos carreteros, de acuerdo al reporte de la SCT [32] funciona de manera similar a la siguiente : Al recibir la llamada de emergencia, un especialista, realiza las preguntas de rutina para conocer: el tipo de accidente, el kilómetro en el que ocurrió, el número de heridos y la magnitud del evento; posteriormente se envían las unidades desde el centro de atención a emergencias más cercano al lugar del siniestro. Al tiempo que transcurre, desde el momento en que se recibe la llamada hasta que los servicios de emergencia llegan al lugar del siniestro se le llama tiempo de respuesta. Para ilustrar este proceso, conocido también como: evaluación y respuesta de las llamadas de emergencia en carreteras, se muestra el siguiente diagrama.

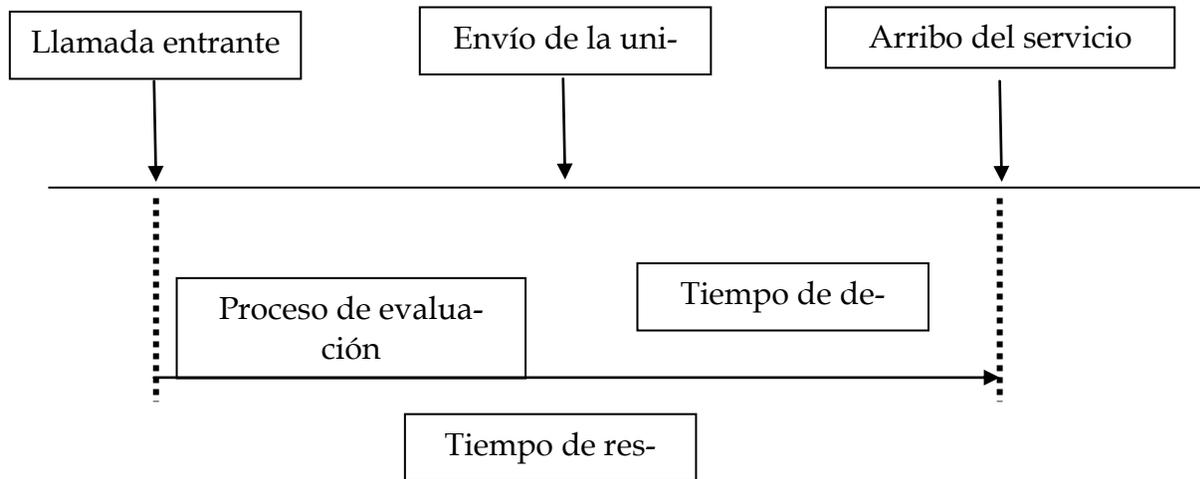


Figura 4 Diagrama del proceso de evaluación de las llamadas de emergencia
Fuente: Basados en el trabajo de Nuskin Coskun y Rizvan Erol [39]

México está conectado por más de 366,807 kilómetros de vías carreteras [40], las cuales enlaza al país a lo largo y ancho del territorio. La siguiente figura muestra la red carretera de la República Mexicana con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI.

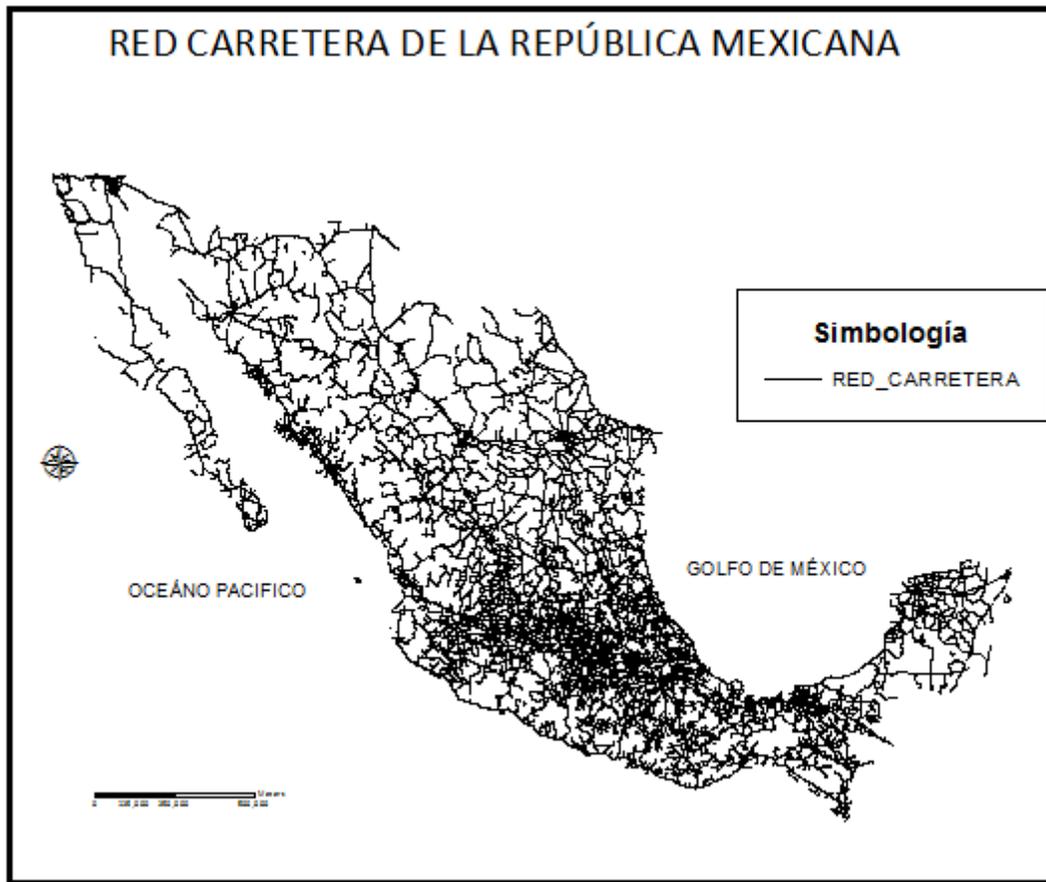


Figura 5 Mapa de la red carretera de México

Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI usando el SIG: ArcMap

La autopista México - Querétaro es uno de los principales tramos carreteros del país, conecta al centro con el norte, por esta vía circulan diversos tipos de transportes como: autobuses, vehículos particulares, camiones de carga, autobuses de pasajeros. El tramo de estudio de esta investigación, comprende desde el kilómetro 169 que corresponde a la caseta de Tepetzotlán en el Estado de México y hasta el Bulevar Bernardo Quintana en el Estado de Querétaro, que se ubica en el kilómetro 212. Esta vía está clasificada como tipo A por la SCT; la vía contiene al menos cuatro carriles y una división central, el mapa 1 (en la sección de Anexos) contiene esta información.

Una manera de delimitar los alcances de la investigación es a través de la selección de métodos, técnicas y herramientas que permitan abordar de manera adecuada el problema a tratar. Como parte del método científico, el estado del arte, representa las investigaciones que se han realizado en los últimos cinco años y que están relacionadas directamente con la investigación en cuestión, por lo que a continuación se muestra las metodologías más relevantes para esta investigación

Capítulo 2. Metodología general de los modelos de Investigación de Operaciones

Este capítulo contiene la teoría necesaria para abordar el problema de ubicar los servicios médicos de emergencia en el tramo de la autopista México-Querétaro, desde el enfoque de la investigación de operaciones y los Sistemas de Información Geográfica; algunas metodologías, clasificación de los modelos de optimización, teoría de localización; modelos relevantes para este estudio; conceptos básicos de un SIG. Se muestran algunas de las metodologías de la I. de O.

Para abordar un problema, desde el enfoque de la investigación de operaciones existen diversos enfoques. Para Fragniere y Gondzino, así como para Coskun y

Rizvan [39, 41], es fundamental formular el problema, definir las variables a evaluar, examinar un modelo (de un problema afín) que haya sido desarrollado, evaluar el mejor resultado (de acuerdo a las alternativas de solución) y concluir basándose en los resultados. Ésta metodología aunque es muy general, permite identificar en grandes bloques las etapas más importantes. La siguiente figura ilustra el proceso anterior:

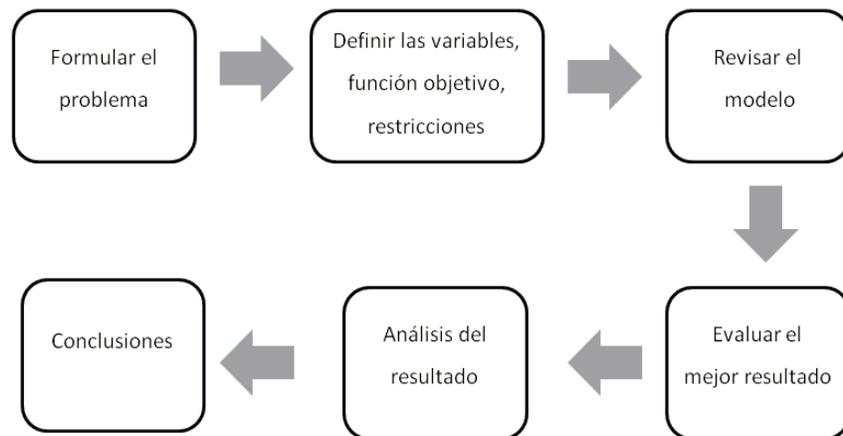


Figura 6 Metodología general de la Investigación de Operaciones
Fuente: Basado en las lecturas de Nusin Conskun y Rizvan Erol [39]

Otra propuesta, se describe en el capítulo uno del libro: “Location Theory A Unified Approach” de Nickel y Puerto [42], en el, se sugiere la idea de trabajar con una lista ordenada, que comprende los pasos fundamentales de acuerdo a lo que los autores llaman *solución a los problemas de localización*, el proceso a seguir incluye: identificar el problema y sus alcances, es decir, definir qué y hasta qué punto se va a resolver; Una vez elegida la función objetivo, es necesario recopilar y seleccionar los datos que sean útiles al modelo (minería de datos); En algunos modelos es posible obtener diversas soluciones factibles, sin embargo lo enriquecedor es elegir

aquella que sea la mejor, ya sea usando métodos propios del algoritmo de solución o comparando valores de distintos resultados; Una vez elegida la mejor solución se visualizan resultados para proponer mejoras y generar alternativas viables. Una interpretación gráfica se muestra a continuación:

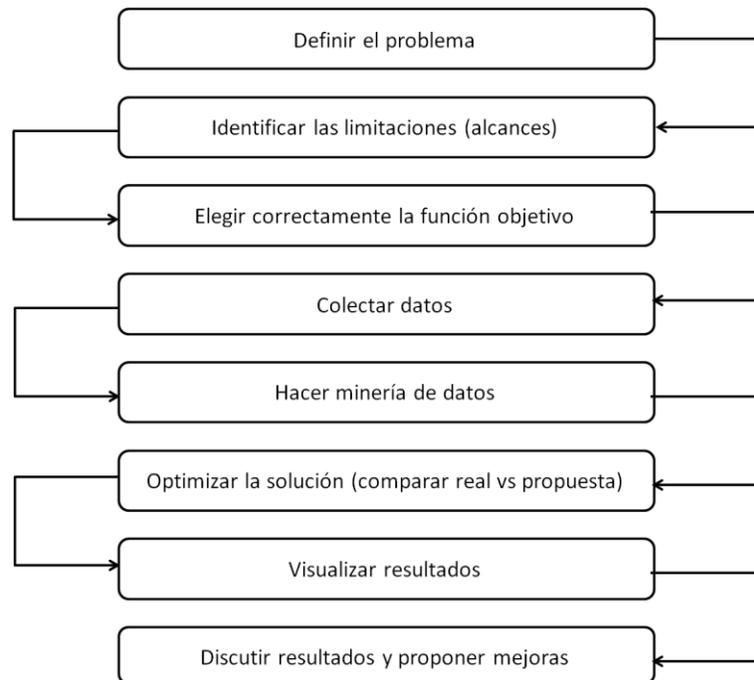


Figura 7 Metodología para los problemas de optimización

Fuente: Elaboración propia basada en las notas del capítulo I del libro de Nickel y Puerto [42]

Por último, y de acuerdo con Jensen y Bard [43], la manera de resolver problemas desde el enfoque de la investigación de operaciones se puede ilustrar en la siguiente figura:

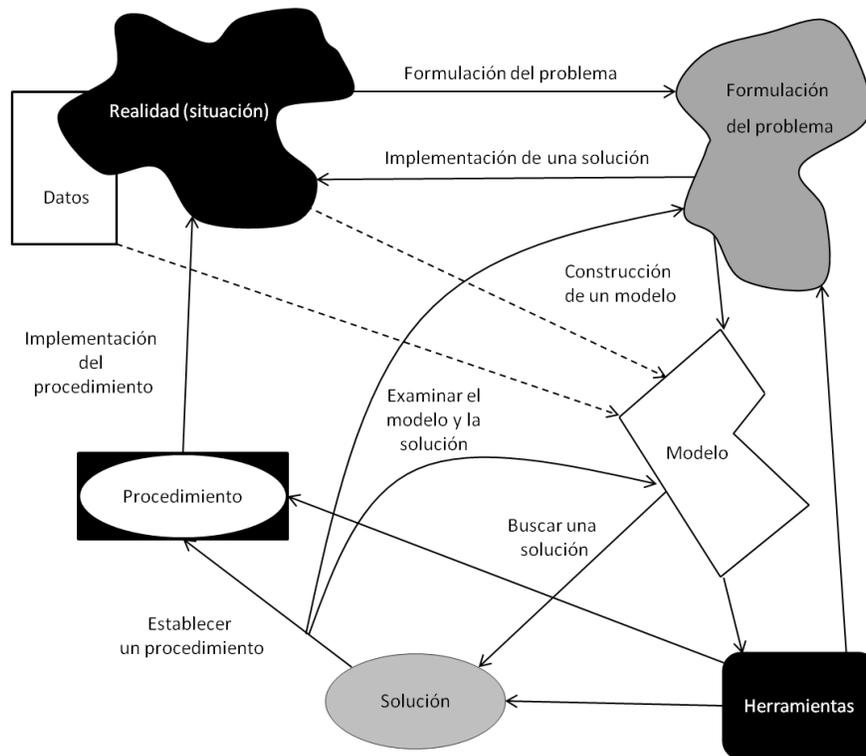


Figura 8 Proceso de solución de problemas desde el enfoque de la I. de O.

Fuente: Traducción del trabajo de Jensen y Bard: “Figure 1.1 Outline of the problem-solving process” [43]

El proceso anterior parte de una **situación de la realidad** (es decir una parte, un pedazo, una particularidad o un conjunto delimitado de acontecimientos) para la cual existen **datos** con los cuales se puede trabajar (la importancia de los datos radica en la posibilidad de medir o cuantificar las variables involucradas en el problema), de ahí se **formula el problema** como una interpretación de la situación (esta interpretación es distinta para cada enfoque y para cada modelador además es propuesta para ofrecer una solución a la formulación planteada del problema), con base en lo anterior se genera el **modelo** (del cual, los datos, la situación de la realidad y la formulación influyen directamente en su construcción) el cual puede utili-

zar algoritmos conocidos, métodos de búsqueda específicos... (**herramientas** que fortalecen al modelo en la búsqueda de la mejor solución), con el modelo y las herramientas se construirá la solución que mejor respuesta dé al problema planteado (es recomendable analizar la solución y proponer alternativas ya que no siempre la mejor solución es la que más conviene), para mejorar la solución es necesario **examinar el modelo y la solución** ya sea para suavizar las restricciones o para modificar parámetros, en algunos casos es posible implementar la solución para ello se requiere establecer un procedimiento, es decir la serie de pasos necesarios que lleven a la generación de la solución del modelo propuesto al problema planteado.

La figura anterior, muestra un esquema secuencial, que además de mostrar las partes fundamentales, también ilustra las conexiones y relaciones de cada una de ellas dentro del contexto de la investigación de operaciones. Cada uno de los componentes de la figura tiene un papel muy importante y, a medida que se visualizan la relación que existe con otros componentes, podría decirse que cada uno de los componentes es fundamental para el funcionamiento del todo.

Una vez revisadas las metodologías, se describen las clasificaciones de los problemas de Optimización, para contextualizar el problema a abordar.

2.1 Clasificación de los Problemas de Optimización

De acuerdo con Rao (p. 14) [44], los problemas de optimización se clasifican de diversas maneras, algunas de ellas dependen de:

1. Existencia de restricciones

Cualquier problema de optimización puede o no tener restricciones, lo que le da un parámetro de clasificación (para el caso de optimización sin restricciones consultar: el capítulo dos: “Fundamentals of Unconstrained Optimization” de Nosedal y

Wright [45] o el capítulo 5: “Newton’s Method for Nonlinear Equations and Unconstrained Minimization” de Dennis y SchnabelSch [46]).

2. Naturaleza del diseño de las variables

Se pueden clasificar en dos categorías; en la primera, el problema es encontrar un conjunto de valores para los cuales los parámetros de la función objetivo y las restricciones funcionan optimamente. La segunda categoría, trata de encontrar el conjunto de parámetros (que son todas las funciones continuas de algún otro parámetro) para una función objetivo y restricciones.

3. Estructura física del problema

Para esta clasificación existen dos tipos: control óptimo y control no óptimo. Los problemas de control óptimo son descritos por dos tipos de variables: las de control y las estáticas. Las variables de control son frecuentemente usadas en sistemas evolutivos que controlan el paso de un estado a otro en el sistema, para medir el control utilizan unas variables llamadas PI (por sus siglas en inglés Performance Index) que registran el cumplimiento de una serie de restricciones, en cada uno de los estados, y que son necesarias para pasar de un estado a otro. El control no óptimo no restringe el uso de las variables PI sin embargo sí se utilizan indicadores para permitir el paso entre los estados del sistema.

4. Naturaleza de las ecuaciones contenidas

La función a optimizar así como las restricciones pueden diferenciarse por su naturaleza y así ser separadas en problemas del tipo: lineal, no lineal, geométrico, cuadrático.

5. Valores permitidos para las variables de diseño

En algunos problemas, al diseñar el conjunto de valores que puede tomar las variables involucradas, es posible hacer una distinción entre dos tipos de valores: reales o enteros.

6. Naturaleza de las variables

Se refiere a si las variables son estocásticas o deterministas.

7. Separabilidad de las funciones

Se refiere al hecho de separar o no, la función objetivo del conjunto de restricciones.

8. Número de funciones objetivo

Dependiendo de la función y tipo de problema, se puede clasificar en dos: multi-objetivos o de un solo objetivo -también conocida como programación simple-, en problemas que requieren la solución de más de un objetivo, se han desarrollado modelos que combinan funciones de maximización y minimización.

Dentro de los diversos problemas de optimización, existe la teoría de localización la cual se describe brevemente, donde se muestra la relevancia que tiene en el desarrollo de modelos para ubicar servicios:

2.2 Teoría de Localización

La teoría de localización de servicios es una rama de la investigación de operaciones que estudia modelos para ubicar geográficamente el mejor lugar, de una serie de posibles candidatos, para la instalación de uno o más servicios. En general, un modelo de localización de servicios es útil cuando se requiere conocer la mejor ubicación de bienes y/ o servicios (escuelas, bancos, hospitales, bodegas, gasolineras, tiendas departamentales, entre muchas otras) en un área geográfica determinada, recientemente también se ha utilizado para ubicar servicios que se desearía estuvieran alejados de las áreas urbanas, como tiraderos de basura, depósitos orgánicos, fábricas de procesamiento de residuos peligrosos, entre otros.

Para cualquier tipo de modelo, el objetivo puede describirse como una función que optimiza los beneficios (entendiendo beneficio como la generación de ganancias, disminución sin pérdidas) a través de restricciones que pueden estar relacionadas con el tiempo, costos, distancia, número de centros del servicio.

El inicio de la teoría de localización de servicios ha sido atribuido a Pierre de Fermat, Evagelistica Torricelli (quien fuera alumno de Galileo) y Battista Cavallieri, por las aportaciones que hicieran de manera individual al problema Euclidiano de la p mediana [47]. Sin embargo existe un consenso al hablar de Weber como el pionero, por las aportaciones de su libro [48]. También hay diversas aproximaciones para modelar la localización de servicios, y de esta gama se desprenden dos tipos de soluciones; exactas y aproximadas **-también conocidas como heurísticas-** Las soluciones exactas son aquellas que utilizan un algoritmo de solución que puede

resolverse en un tiempo computacional pequeño. Por su parte, las soluciones aproximadas derivan de problemas considerados como NP-Hard o NP-duros, en esta categoría, los recursos computacionales son grandes.

Los problemas de localización de servicios, han sido clasificados desde diferentes puntos de vista; por el tipo de solución que requiere: exacta o aproximada, por la naturaleza de la función objetivo a optimizar: uno o muchos objetivos, por el espacio de decisión: continua, discreta o en redes, por cómo se miden las variables, por lo que miden las variables, por el tipo de optimización de la función objetivo: maximiza o minimiza, minimax, entre muchos otros.

Para ilustrar los diferentes tipos de localización de servicios que existen, se utiliza la siguiente figura, con base en las lecturas de los artículos: [49, 50].

Inicialmente, puede clasificarse a partir de tres categorías: continua, discreta o en redes y partiendo de la función objetivo. La siguiente tabla muestra una matriz que sirve como guía para clasificar a los problemas de localización de servicios (eligiendo renglones y columnas), para el caso del modelo que se utiliza en este trabajo, el problema podría clasificarse en alguna de las siguientes categorías:

Función objetivo		Espacio de decisión			
		Tipo modelo	Discreto	Continuo	Redes
		P-mediana	⊗		
Simple	Múltiple	P-central	⊗		
Min	Minimax	Cobertura	⊗		
Max	Maximin	Probabilístico			

Tabla 5 Clasificación de los problemas de localización de servicios

Fuente: Elaboración propia basada en el capítulo I del libro de Nickel y Puerto [42]

Para clasificar un problema de acuerdo a la tabla 5, se realiza lo siguiente: de acuerdo a la función objetivo

2.3 Modelos de localización de servicios

Los modelos clásicos de localización de servicios de emergencia que han sido reportados en la literatura, en los trabajos de Daskin [50], Araneda Martinez [51]son los siguientes:

Cobertura de conjuntos: tiene como objetivo: minimizar el número de ambulancias necesarias para satisfacer todos los nodos de demanda, desde el nodo más cercano, en un tiempo determinado.

Cobertura máxima de conjuntos: trata de satisfacer la mayor cantidad de demanda, dado un tiempo de respuesta (también llamado tiempo estándar), con un número de vehículos determinado.

P-Center: minimiza el tiempo de respuesta máximo, es decir; el tiempo en el que a lo más puede tardar un vehículo de emergencia en llegar al punto de demanda, considerando *a priori* un número de vehículos de emergencia.

P-mediana: minimiza el promedio del tiempo de respuesta (entre los nodos de demanda y el nodo de servicio más cercano) de número p de vehículos determinado.

En algunos de los modelos, de esta categoría, se asume que los servicios están disponibles en cualquier instante en el tiempo.

Ninguno de los modelos anteriores considera: la disponibilidad del servicio más cercano -puede ocurrir que no exista vehículo de emergencia para atender la demanda en los nodos- , la naturaleza de la ocurrencia de accidentes en carretera - la probabilidad de que ocurra en cualquier tramo de la carretera, o el costo que impli-

caría ubicar un determinado número de estaciones de servicio. Sin embargo, existen modelos que sí toman en cuenta estas y otras consideraciones, como por ejemplo:

Problema de la Cobertura Backup 1: minimiza el número de servicios y también maximiza el número de demanda cubierta por los servicios. La aplicación de este modelo no es recomendable cuando el monto asignado para ubicar los servicios es limitado ya que los resultados del modelo “pueden ser muy costosos” [39].

Problema de la Cobertura Backup 2: es una extensión del modelo BCP1 el cual condiciona la ubicación de los servicios a un número limitado con la finalidad de aminorar los costos que pudieran surgir a partir de los resultados del modelo.

Modelo de Localización en Cobertura Máxima Esperada: es una extensión a los modelos de p-mediana, la principal mejora es que considera un número determinado de servicios como no disponibles asumiendo que estos tienen distribución binomial.

Los modelos multiobjetivos, pueden consultarse en los trabajos de Zanjirani Farahani, SteadieSeifi, and N. Asgari [52].

Dentro del surgimiento de modelos para la localización de servicios y debido al auge de tecnologías de la información, han surgido también modelos que utilizan Sistemas de Información Geográfica antes, durante o después de usar el algoritmo de solución; en general, los modelos que utilizan los SIG antes, para mostrar espacialmente el área de estudio, también lo utilizan después, para mostrar los resultados del modelo. Dentro de este grupo de modelos está el modelo utilizado en esta investigación; el modelo MSAP:

Problema de la Máxima Área de Servicio: es una modificación de los modelos de cobertura máxima de conjuntos. La gran diferencia de este modelo es el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (como las llamadas: áreas de servicio) para generar: zonas que representen el tiempo de viaje en diferentes esca-

las de medición (minutos, horas, kilómetros, metros), isócronas (que miden el área de impacto de uno o varios servicios) y áreas cubiertas . El objetivo de este modelo es maximizar el área o superficie de impacto de un servicio de acuerdo a un número específico de sitios candidatos a ubicar el servicio.

Uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en modelos de cobertura para localización de servicios de emergencia: en los últimos años, los sistemas de información geográfica han sido utilizados como herramientas de análisis:

- En localización de servicios, para conocer y/o predecir la cantidad de carga que soporta la red carretera, buscar rutas óptimas, localizar recursos como: poblaciones, áreas naturales protegidas, vías de comunicación, zonas restringidas o catalogadas como peligrosas, entre otros.
- En prevención de accidentes de tránsito, ayuda a entender cómo está organizado espacialmente el territorio, esto permite explicar la ocurrencia e incidencia de eventos [46]

Después de revisar algunos modelos para localizar servicios de emergencia, es necesario introducir el tema de los sistemas de información geográfica, así que, en los siguientes párrafos se hace una descripción de algunos conceptos básicos de los SIG.

2.4 Conceptos básicos de los Sistemas de Información Geográfica

En este apartado se tratarán conceptos básicos acerca de los sistemas de información geográfica. Es una breve descripción de las características básicas para entender el problema de localización de servicios de esta investigación.

Los Sistemas de Información Geográfica, por sus siglas en inglés GIS (Geographic Information Systems), tienen diversas definiciones:

“Un Sistema de Información Geográfica integra hardware, software y manejo, captura, análisis y visualización de datos en todas las formas referenciadas de información geográfica” [53]

“Son plataformas de información diseñadas para el manejo, captura, almacén y análisis de datos espaciales y no espaciales que a su vez permiten combinar diversos datos para describir de mejor manera el mundo que nos rodea” [54]

“El SIG además de organizar la información de manera transparente, permite realizar diferentes métodos de representación cartográfica de cualquiera de los campos contenidos en la base de datos geo-referenciada” [55]

Pero sin duda, al referirse a un SIG se puede hablar de un conjunto de herramientas tecnológicas que en su conjunto permiten: visualizar, analizar y reproducir datos en diversas escalas geográficas, que a su vez, genera información cuantitativa y cualitativa. El tema de los SIG es bastante amplio, por lo que, en este apartado sólo se explican algunos conceptos que serán útiles para el propósito de esta investigación. Para iniciar con la descripción de los conceptos usaremos el concepto de modelos de datos, representación de datos y áreas de servicio.

Modelos de datos: es una construcción matemática para la construcción geográfica de objetos y superficies como datos.

Representación de los datos: es de gran utilidad cuando se manejan diversos datos en distintas escalas, ya que se puede homogeneizar el análisis y generar información a partir de ello. La representación de los datos puede ser de dos tipos:

- **Vector;** puntos, líneas y polígonos
- **Raster;** mallas, imágenes [53]

Áreas de servicio: existen varias maneras de representar áreas de servicio en un SIG, las más representativas son:

Cobertura circular (área de influencia o buffer), el cual es utilizado en áreas con influencias de señales de radar cuando no se considera la variación topográfica del lugar.

Polígonos de Thiessen, mapea las áreas más cercanas a los servicios, por ejemplo en una localidad ubica las áreas cercanas a una escuela, banco o centro médico

Viewshed, es utilizado para identificar regiones desde uno o más puntos fijos

Tiempo de viaje a las zonas, es el modelo más utilizado cuando las decisiones incluyen menor distancia o tiempo, ya que es posible visualizar las áreas o zonas con distintas medidas de tiempo o distancia.

Para ilustrar los conceptos anteriores se diseñaron las siguientes figuras, usando datos del tramo carretero México-Querétaro

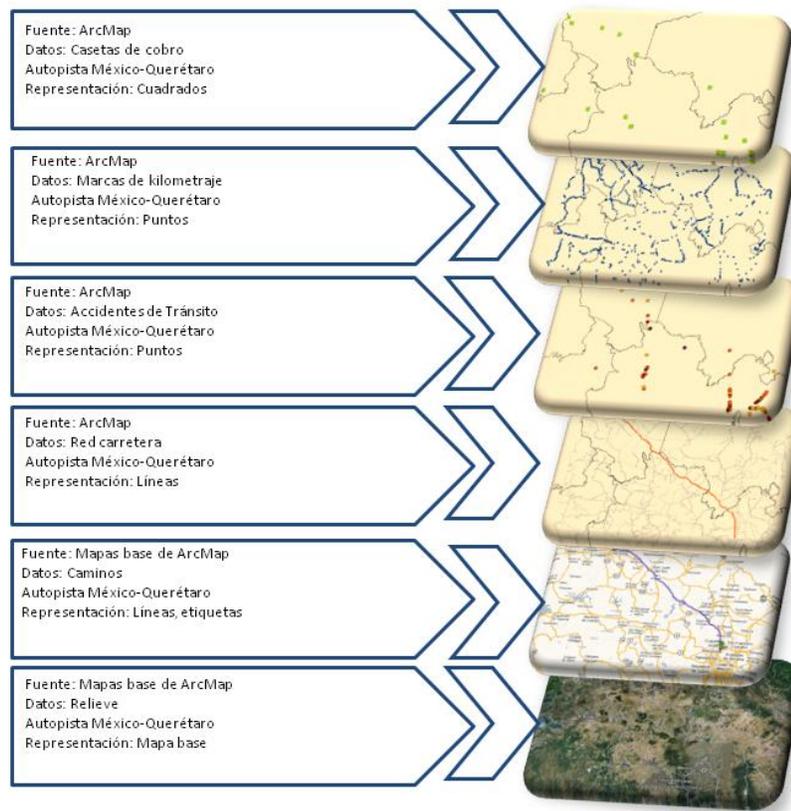


Figura 9 Capas temáticas para representar datos en un SIG

Fuente: Elaboración propia usando ArcMap versión 10

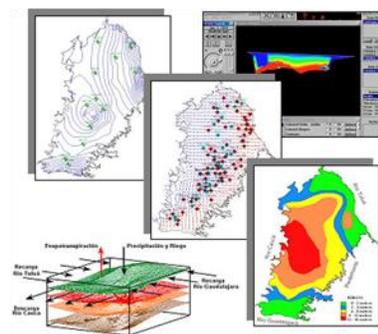


Figura13. Ejemplo del uso de la herramienta *áreas de servicio* en un SIG

Fuente: Buscador de Google [56]

Capítulo 3. Definición del modelo de análisis

En este capítulo se describe el modelo utilizado para el problema de este estudio, así como los criterios de selección del modelo. Referirse al modelo de análisis es hablar del modelo que será utilizado para ubicar los servicios de emergencia en el tramo carretero México-Querétaro.

Primero, se muestra la descripción del modelo, para continuar con la justificación de su uso y por último el ajuste que se realizó al mismo.

3.1 Modelo Maximal Service Area Problem (MSAP)

El modelo MSAP, por sus siglas en inglés Maximal Service Area Problem, es un modelo de programación entera, para resolver el problema de localización discreta de servicios. Surge como una modificación del modelo Maximal Coverage Location Problem, MCLP y fue desarrollada por Vini Indriasari *et al* en el año 2010 [1], en este modelo el objetivo es maximizar el área total de servicio para un número especificado de centros servicios.

La descripción del modelo puede verse a continuación:

$$\text{Max } z = \sum_{i \in I} w_i x_i$$

$$\sum_{j \in J} a_{ij} y_j \geq x_i \quad \forall i \in I$$

$$\sum_{j \in J} y_j = p$$

$$x_i \in \{0,1\}, \quad y_j \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J$$

i, I el índice y el conjunto de nodos de demanda (puntos negros)

j, J el índice y el conjunto de nodos de servicios de atención a emergencias

w_i = población que será atendida en el nodo i

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{si el nodo } i \text{ es atendido por uno o más servicios de emergencia} \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{si un servicio de emergencia es localizado en el nodo } j \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el objeto de demanda } i \text{ cae en el area de servicio del servicio } j \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

p = Número de servicios de emergencia a ser instalados

3.2 Justificación del uso del modelo

Una de las principales ventajas de este modelo es el uso de los Sistemas de Información Geográfica, el cual, permite generar diversas escalas de análisis a través de capas que representan datos como: accidentes de tránsito, zonas urbanas, casetas de cobro, relieve y características geográficas del tramo de estudio, además haciendo uso de las herramientas de aplicación, es posible construir “áreas de servicio”, útiles para esta investigación ya que describen a las regiones en donde se cumplen ciertas condiciones como: tiempo de viaje, distancia en metros. El uso de los SIG además de fortalecer el modelo de análisis permite generar escenarios y usar diversos datos, que son representados geo-espacialmente. Visualizar la distribución y comportamiento de los eventos, en este caso, accidentes de tránsito es de gran utilidad para contextualizar el problema desde diversas perspectivas.

El programa ArcMap, que se utilizó en esta investigación, cuenta con una herramienta para ubicar servicios (*service area*) la cual, calcula la distancia en (metros o kilómetros) y el tiempo del recorrido del viaje (en segundos, minutos u horas) para cada tramo de la red, desde cada uno de los nodos de servicio (para uno o varios nodos). Es necesario, generar capas temáticas de análisis en el SIG -con la mayor cantidad de datos disponibles- para obtener información. En la siguiente tabla se muestran las diferentes capas de análisis disponibles en este estudio:

Características de la capa de análisis	Fuente de los datos
Accidentes de tránsito del año 2007	Secretaría de Comunicaciones y Transportes [32]
Polígonos urbanos o Manchas urbanas	Instituto Nacional de Estadística y Geografía [57]
Municipios	Instituto Nacional de Estadística y Geografía [57]
Estados	Instituto Nacional de Estadística y Geografía [57]
Marcas de kilometraje	Instituto Nacional de Estadística y Geografía [57]
Ubicación de los Servicios de Emergencia	Secretaría de Comunicaciones y Transportes [32]
Tramo carretero indicando: ambos sentidos, retornos y desviaciones	Elaboración propia utilizando las herramientas de ArcGis [58]

Tabla 6 Capas de análisis para la autopista México - Querétaro
Fuente: Elaboración propia con datos de la SCT, INEGI [32, 57]

A continuación se explican los criterios de selección del modelo así como de la elección de las variables que se utilizan para optimizar la ubicación de los servicios de emergencia en la autopista México-Querétaro administradas por CAPUFE.

3.3 Criterios de elección del modelo

Para la elección del modelo de localización de servicios discreta se realizó una revisión en la literatura especializada y se encontraron tres clasificaciones: modelos que usaban SIG; modelos que no usaban SIG, y además podía distinguirse de entre los modelos multi-objetivo y los de un solo objetivo. Es importante destacar que para elegir el tipo de modelo, para este estudio, fue necesario, conocer la naturaleza del

mismo. Como se ha mencionado anteriormente, se trata de ubicar de manera óptima a los servicios médicos a lo largo del tramo carretero México-Querétaro con la finalidad de reducir las fatalidades causadas por la demora en el tiempo de respuesta de dichos servicios de emergencia, haciendo uso de las herramientas de los Sistemas de Información Geográfica.

Es de suma importancia, considerar el tipo de variables involucradas en el problema. Al recolectar la información se obtuvieron tablas con diversos datos por lo que era necesario hacer una revisión de estos, para: 1) seleccionar adecuadamente -de acuerdo a los objetivos de este trabajo- las variables a optimizar y 2) notar la relación entre cada una de las variables para el análisis de resultados. Una herramienta útil es el análisis de impacto cruzado de las variables, que se genera, construyendo una matriz conocida como: *Matriz de impacto cruzado*, la cual se llena de la siguiente manera: Se pondera la relación que existe entre cada elemento de cada renglón con cada elemento de la columna excepto en la diagonal (si bien no existe una regla para ponderar, es recomendable no asignar muchos valores, más de 5, para medir el impacto de las variables), para determinar el valor de la ponderación se sugiere analizar el problema a resolver y la información disponible.

A continuación se ejemplifica la manera en cómo se asignaron los valores a la matriz diseñada para el estudio: Suponemos una matriz w de dimensión $m \times n$, llamaremos $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ al conjunto de *elementos renglón* de la matriz w , y $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ al conjunto de *elementos columna*. Si un elemento $a_i, a_i \in A$, de la matriz w está fuertemente relacionado con un elemento $b_j, b_j \in B$, de w , entonces al lugar (a_i, b_j) se le asigna: 3 si la relación es fuerte; 2 si la relación es proporcional (implica que la relación es equilibrada en ambas variables); 1 si la relación es débil.

A continuación se muestra la matriz de criterios para el problema planteado:

	Kilómetro	Cantidad accidentes	Muertos	Heridos	Daños materiales
Kilómetro	-	3	3	3	3
Cantidad accidentes	2	-	3	3	3
Muertos	2	3	-	3	2
Heridos	2	3	2	-	2
Daños materiales	2	3	2	2	-

Tabla 7 Matriz de impacto cruzado

Fuente: Elaboración propia basada en el trabajo de Lara Rosano [59]

La matriz anterior permite visualizar el nivel de la relación entre las variables: kilómetros, cantidad de accidentes, muertos, heridos y daños materiales, para el caso del tiempo de respuesta, se puede medir mediante el SIG permite medir el tiempo de respuesta de cada uno de los servicios de emergencia (usando la herramienta: *service area*)

Ahora, es importante puntualizar, que el objetivo de este trabajo no es resolver un problema de ruteo vehicular (encontrar la mejor ruta entre nodos de servicio y demanda), si no de localizar servicios. En este contexto habrá ciertos aspectos que, por la naturaleza del problema a resolver y por los datos disponibles para trabajar, el modelo no podrá considerar, como son:

- a) La disponibilidad de las ambulancias en los distintos nodos de servicio.
- b) La capacidad de respuesta de los nodos de servicio.

- c) La ocurrencia de los accidentes (aleatoria o probabilística).
- d) El estado de la red carretera, al momento del siniestro, que atrase o ayude para el traslado de las víctimas
- e) Los costos de ubicar (o reubicar las actuales) nuevos centros de servicio.

De acuerdo a la literatura consultada, existen modelos que consideran alguno (no todos a la vez) de estos aspectos, para este estudio, no se cuenta con datos disponibles con los que se puedan trabajar, y es que, el problema de reducir fatalidades debido a la eficiencia de los servicios de emergencia, requiere de la participación conjunta del personal de CAPUFE.

Será necesario, entonces, y para trabajos futuros, integrar la mayor cantidad de datos y robustecer los modelos que puedan dar una mejor aproximación al problema de los servicios de emergencia en carreteras de peaje.

Una vez que se ha mostrado el aspecto de la modelación, se describe el uso que se le dio a los datos y cómo se generó la información a partir de ellos:

Con los datos de **Tabla 6** “Capas de análisis para la autopista México - Querétaro” se representó espacialmente la situación actual del tramo de estudio; se trata de un diagnóstico que permitió conocer la cobertura: del conjunto y cada uno de los servicios de emergencia en tiempo -minutos- y distancia -kilómetros- de los servicios de emergencia actuales, a lo largo del tramo carretero México-Querétaro, dichos servicios son tres, por orden de ubicación de sur a norte: Tepetzotlán, San Francisco y Palmillas. Los resultados del diagnóstico fueron los siguientes:

3.4 Resultados del diagnóstico de la autopista México-Querétaro

Los mapas de los que se hace referencia en esta sección pueden consultarse en los Anexos al final de este documento. -los mapas pueden verse en la sección de **Anexos** “Diagnósticos de la autopista México-Querétaro”.

Una vez realizada la representación espacial, se utilizó la herramienta *área de servicio* en el SIG para conocer **el estado actual de la autopista**. El algoritmo del SIG genera tramos de acuerdo a las clases que se generen; cada tramo comparte la misma distancia. Los resultados del análisis fueron utilizados, también para generar parámetros en el modelo matemático MSAP.

Para el análisis de la cobertura (impedancia) en minutos del servicio médico de emergencia “Palmillas” y “San Francisco”, se diseñaron diez clases para agrupar el tiempo de recorrido a lo largo del tramo carretero, los cuales comprenden los siguientes intervalos: [0,10], (10,15], (15,20], (20,30], (30,40], (40,50], (50,60], [60,70], (70,80], (80,90].

Como puede verse en la Figura 10, cada una de las clases tiene un color, que varía de acuerdo a la distancia con respecto a cada uno de los SME.



Figura 10 Impedancia en minutos para los SME Palmillas y San Francisco

Fuente: Elaboración propia usando ArcMap versión 10

Los resultados del análisis mediante el SIG mostraron que, para el servicio de emergencia “Palmillas” ubicado en el kilómetro 148 de la autopista México-Querétaro, en un tiempo de 10 minutos existe una cobertura de 71 tramos. En la **Figura 11**; el eje horizontal representa la cantidad de minutos, el eje vertical contabiliza el número de tramos que son cubiertos desde el servicio médico de emergencias a una distancia de 80 kilómetros por hora para cada uno de los rangos.

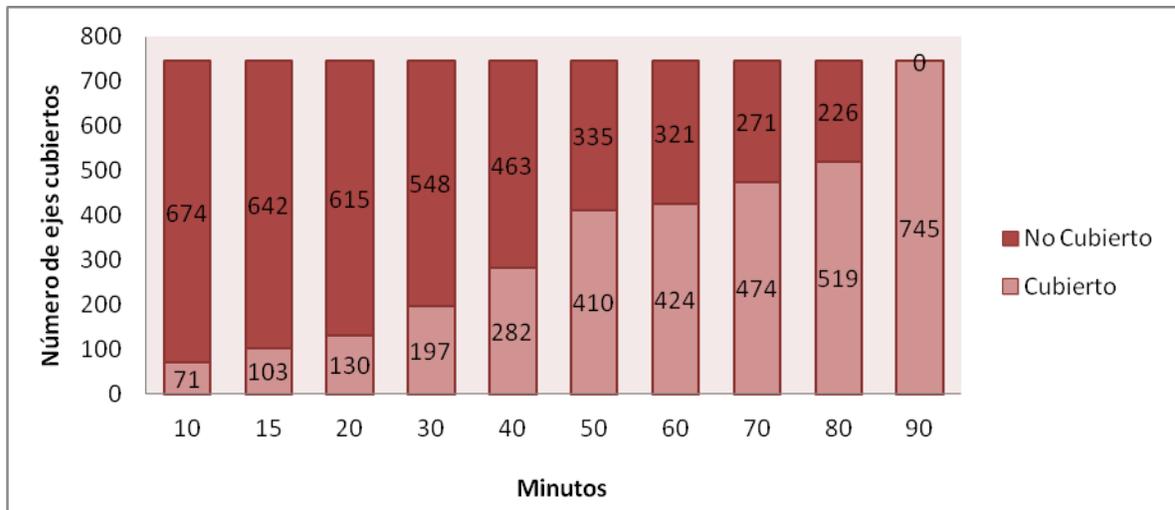


Figura 11 Cobertura de la autopista México-Querétaro desde el SME Palmillas
Fuente: Elaboración propia usando información generada en ArcMap [60]

Tal y como lo muestran los resultados en la **Figura 11**, el SME Palmillas cubre la mitad de los tramos de la autopista después de los cuarenta minutos. Es de interés para este estudio notar la cantidad de tramos de la autopista que se cubren en los primeros diez minutos.

Para el caso del servicio médico de emergencia “San Francisco” ubicado en el kilómetro 93 de la autopista México-Querétaro, la gráfica que corresponde al análisis de la cobertura de los tramos de la autopista puede verse en la **Figura 12**.

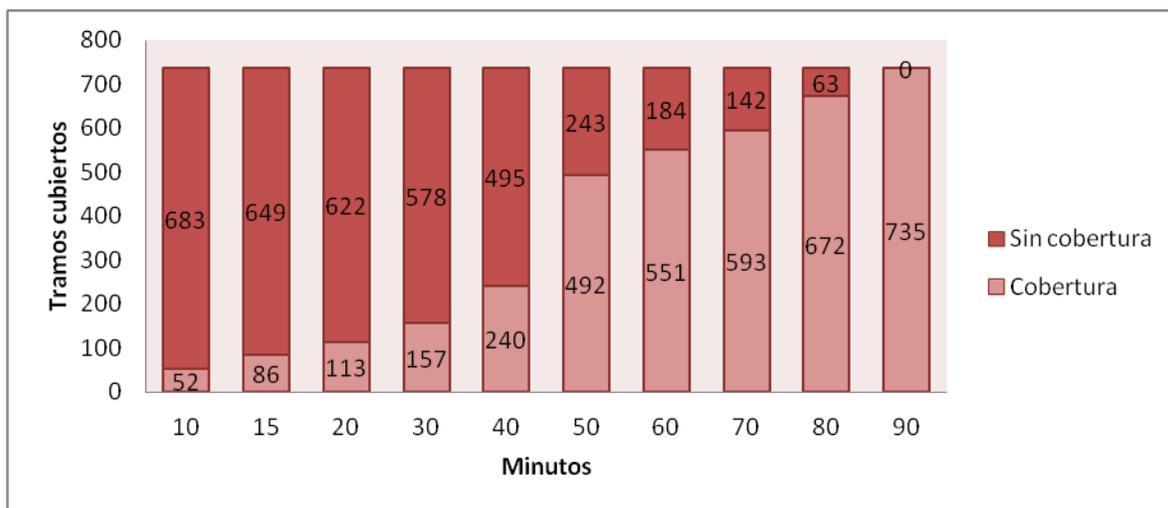


Figura 12 Cobertura de la autopista México-Querétaro desde el SME San Francisco

Fuente: Elaboración propia usando información generada en ArcMap [60]

La situación para el caso de la cobertura del SME San Francisco no es muy diferente al anterior, ya que, como puede observarse en la **Figura 12**, tan sólo 52 tramos son cubiertos en los primeros diez minutos.

Para el caso del servicio médico de emergencia “Tepotzotlan” ubicado en el kilómetro 43 de la autopista México-Querétaro, se diseñaron más clases, para cubrir la totalidad del tramo de estudio y para analizar con más detalle la cantidad de tramos que se cubren en los primeros diez minutos, las clases pueden verse en la Fi-

gura 13, los resultados del análisis de la cobertura de los tramos, se muestran en la Figura 14.

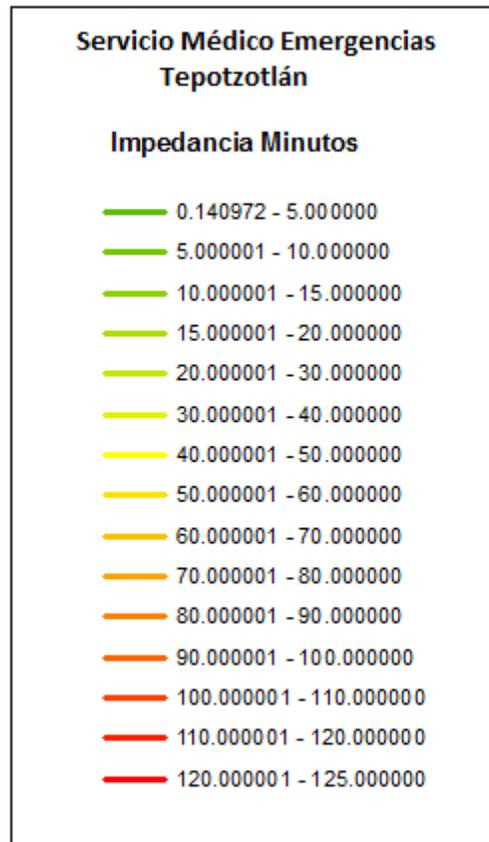


Figura 13 Impedancia en minutos para SME Tepetzotlán

Fuente: Elaboración propia usando ArcMap versión 10 [60]

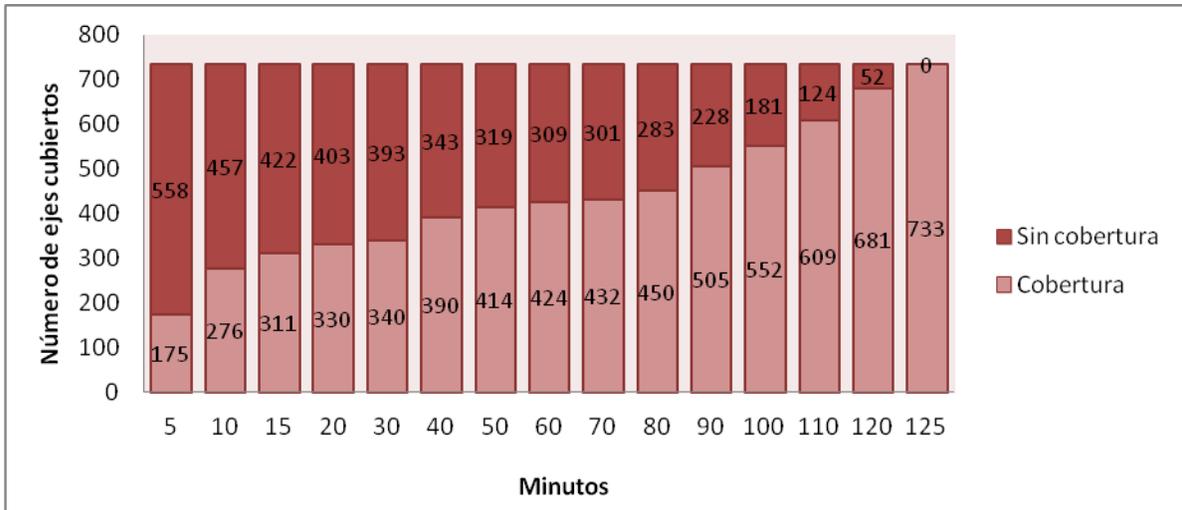


Figura 14 Cobertura de la autopista México-Querétaro desde el SME Tepoztlán

Fuente: Elaboración propia usando información generada en ArcMap [60]

En el caso del SME Tepetzotlán, la cobertura es mayor en los primeros cinco y diez minutos, que en el caso de las dos anteriores, por la ubicación de la unidad que presta servicio médico de emergencia, el tiempo de cobertura de los tramos que se encuentran en el Estado de Querétaro es de hasta 125 minutos.

También se analizó la cobertura para los tres servicios médicos a la vez, las clases que se diseñaron en el SIG pueden verse en la **Figura 15**, en este caso sólo se necesitaron 8 diferentes rangos para cubrir el tramo carretero de estudio.



Figura 15 Impedancia en minutos de los tres SME en la autopista México-Querétaro

Fuente: Elaboración propia usando ArcMap versión 10 [60]

Para obtener la información necesaria para correr el algoritmo de optimación usando el software LINGO se realizó lo siguiente: **Primero**, era necesario conocer las áreas de servicio para los tres centros que brindan atención a las llamadas de emergencia en la autopista México - Querétaro, para ello se utilizaron los mapas que representan el tiempo -en minutos- que existe de cada uno de los servicios de emergencia a lo largo del tramo carretero, estos tiempos consideran ambos sentido de la autopista así como las desviaciones, la medición que hace el SIG se basa en la

fórmula para calcular la velocidad $v = \frac{d}{t}$, se utilizó 80 km/hr como parámetro de velocidad. **Segundo**, cada uno de los mapas generó información acerca de la accesibilidad de la red carretera, la cual fue utilizada para visualizar, espacialmente, y medir la cobertura en la red carretera – como resultado se generó el diagnóstico de la situación actual del tramo de estudio. Se utilizaron los datos de los accidentes del año 2007, para observar su incidencia espacial. **Tercero**, con la información generada, se obtuvo un nuevo dato que representa la proximidad de los tramos de la autopista que están más cercanos a los servicios de emergencia, este dato se le conoce como área de servicio, que, de acuerdo con Vini Indriasari et al [1], son áreas (en este caso tramos de la autopista) que se encuentran muy cerca de alguno de los servicios de emergencia. Se tomaron en cuenta aquellos tramos que estaban a una distancia mayor a los quince minutos de cada uno de los SME propuestos. Por último, era necesario conocer los puntos negros o zonas donde han ocurrido más de 3 accidentes en un periodo de 3 años. Desafortunadamente los datos obtenidos para esta investigación no reportan la fecha del registro, sólo se sabe que ocurrieron durante el año 2007, tampoco se tiene información de otros años por lo que habría que generar puntos negros, o algún concepto similar, basándose en su definición raíz. Para ello se creó, usando herramientas del SIG, un parámetro llamado *Grupos* que une (de acuerdo a valores que se ingresen) tramos de carretera que comparten características por conveniencia, se usará la distancia, en minutos. Para este estudio, se consideraron el cálculo de distancia en dos parámetros:

- **Kilómetros**, de cinco en cinco (iniciando en los cinco primeros y hasta los sesenta y cinco), desde los nodos de servicio y recorriendo ambos sentidos del tramo de la autopista –tomando en cuenta los retornos, caminos adyacentes y entronques en la red.

- **Minutos**, para medir este parámetro, se especificaron rangos que varían entre los 5 y 45 minutos, acuerdo a la cantidad y ubicación del servicio médico de emergencia que se analice.

Con la información que arrojó la herramienta “área de servicio” del SIG, se detectaron tramos de la autopista en los cuales el servicio de emergencia estaba a una distancia mayor a los cuarenta minutos (suponiendo 80 kilómetros por hora), estos tramos se encuentran entre las ubicaciones actuales de los servicios de emergencia de San Francisco y Palmillas en el Estado de México y en la zona cercana a Bulevar Bernardo Quintana en el Estado de Querétaro. Basandose en el hecho de que la primera hora después de que ocurre un accidente de tránsito, las víctimas tienen más probabilidad de vida si reciben atención pre-hospitalaria y especializada oportuna, se utilizó un tiempo de 15 minutos, como estimación, para la distancia en recorrido desde los SME a lo largo de los tramos de la red.

Capítulo 4. Aplicación y Resultados

En este capítulo se muestran los resultados de la aplicación del modelo MSAP con las adecuaciones realizadas en los parámetros w_i y a_{ij} . En la parte de Anexos se puede ver el mapa que muestra la propuesta de las ubicaciones de los servicios de emergencia en la autopista México - Querétaro. Las conclusiones se encuentran en la parte final de este capítulo.

4.1 Aplicación del modelo MSAP al tramo carretero México-Querétaro

Se modificaron algunos parámetros del modelo MSAP; para el caso de w_i se ponderó a los sitios candidatos con base en su ubicación y la cobertura (en tiempo) de los tramos carreteros. Para x_i , que corresponde a los tramos de la red, sólo se dio prioridad a los tramos más alejados, ya que, aquellos tramos que estaban próximos serían cubiertos dada la cercanía de los servicios de emergencia. Por otra parte, el parámetro a_{ij} se generó utilizando la herramienta del SIG "área de servicio" con el criterio: distancia en minutos.

A continuación se describe los parámetros de entrada para cada una de las instrucciones del modelo MSAP:

EL modelo MSAP es:

$$\text{Max } z = \sum_{i \in I} w_i x_i$$

s.a:

$$\sum_{j \in J} a_{ij} y_j \geq x_i \quad \forall i \in I$$

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{si el tramo } i \text{ es cubierto por uno o más servicios de emergencia} \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el objeto de demanda } i \text{ cae en el area de influencia del servicio } j \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{si un servicio de emergencia es localizado en el nodo } j \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

w_i = ponderación para cada nodo i

i, I : el índice y conjunto de nodos de demanda

j, J : el índice y conjunto de nodos de servicios de atención a emergencias

El parámetro de a_{ij} se generó utilizando la herramienta *Service Area* del Sistema de Información Geográfica ArcMap ver. 10, en la autopista México - Querétaro, considerando no solo ambos sentidos de la vía sino también retornos y entronques que pudieran utilizar los sistemas de emergencia.

La siguiente y última restricción del modelo:

$$\sum_{j \in J} y_j = p$$

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{si un servicio de emergencia es localizado en el nodo } j \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

$p =$ Número de ambulancias a ser ubicadas

Para elegir los puntos candidatos a ubicar los servicios de emergencia se utilizaron los siguientes criterios:

- Que exista lugar o espacio geográfico para ubicar el servicio médico de emergencia
- Que exista un retorno o entronque para cambiar de carril a una distancia no mayor a los diez minutos

Para conocer los puntos que serían adecuados para ubicar a los SME se realizó una inspección espacial a lo largo de la autopista México - Querétaro. Se encontraron varios puntos candidatos que cumplían con las condiciones antes mencionadas, dichos puntos tenían diferente prioridad de ser elegidos (ya que algunos cubrían más tramos en menor o igual tiempo, o se encontraban próximos a retornos o case-tas de otros servicios). Se consideró como tramo de la red carretera a cualquier segmento que comparta características semejantes -en este caso, distancia de recorrido en minutos-. El sistema de información geográfica ArcMap permite generar dichos tramos. Un área de influencia de un servicio de emergencia es todo tramo de la red que cumpla con la condición de recorrido en minutos establecida. La condición anterior es lo que será considerado como tiempo de respuesta de los servicios de emergencia

El tiempo de respuesta usado en el SIG fue de hasta 15 minutos, por lo que, las áreas de influencia que se generaron están entre los cero y los quince minutos. Para validar los resultados de la ubicación de los SME, se utilizaron los datos de accidentes de tránsito del año 2007 en el SIG, como puede verse en el **Mapa 5** "Propuesta

de la ubicación de los servicios de emergencia en la autopista México-Querétaro Caso accidentes del 2007”, cada uno de los accidentes puede ser atendido en un tiempo estimado de hasta 15 minutos.

4.2 Resultados

Los resultados que se obtuvieron son los siguientes: se necesita ubicar siete servicios médicos de atención a emergencias para cubrir en un tiempo de hasta 15 minutos los tramos de la autopista México-Querétaro (cuatro nuevos), no se modificó la ubicación, ni eliminó alguno de los tres servicios médicos de emergencia actuales. Existen varios lugares candidatos, sin embargo el mejor lugar para instalarlos es aquel que se encuentra próximo a un retorno; de esta manera se garantiza que el servicio de emergencia pueda tener acceso a ambos sentidos de la autopista. En la siguiente tabla se puede ver la cantidad de tramos que cubre cada uno de los tres servicios de emergencia actuales, la información fue generada utilizando la herramienta “área de servicio” en ArcMap versión 10.

SME	Número de tramos que cubre	Tiempo máximo (minutos) de la cobertura
Tepetzotlán	317	20
San Francisco	116	25
Palmillas	325	45

Tabla 8 Cobertura de los Servicios Médicos de Emergencias actuales, autopista México-Querétaro

Fuente: Elaboración propia basada en los resultados del SIG: ArcMap [60]

Como puede verse en la **Tabla 8**, el servicio médico de emergencia “Palmillas” además de cubrir la mayor cantidad de tramos, también requiere de hasta 45 minu-

tos para llegar a los tramos más alejados (ubicados cerca del Bulevar Bernardo Quintana en el Estado de Querétaro). Una vez que se ubicaron los cuatro SME propuestos, el tiempo de respuesta se redujo hasta los veinte minutos, como puede verse en la **Tabla 9**, la ubicación puede verse en el Mapa 4 en la parte de anexos.

SME	Número de tramos que cubre	Tiempo máximo (minutos) de la cobertura
Tepetzotlán	269	20
San Francisco	76	15
Palmillas	94	20
SME_1	65	15
SME_2	145	20
SME_3	22	15
SME_4	66	15

Tabla 9 Cobertura de la propuesta de los Servicios Médicos de Emergencias, autopista México-Querétaro

Fuente: Elaboración propia basada en los resultados del SIG: ArcMap [60]

Gráficamente, la comparación entre los tramos que cubren los servicios médicos de emergencia propuestos y los actuales, puede verse en las **Figuras 19 y 20**, en la primer gráfica, puede verse como, los tres servicios médicos de emergencia no son suficientes para cubrir en un tiempo de hasta 15 minutos los tramos de la red. Mientras que en la segunda gráfica, la mayoría de los SME pueden recorrer los tramos en un tiempo de quince minutos; sólo existen dos tramos carreteros -uno para cada SME- en los que el tiempo de recorrido es de veinte minutos.

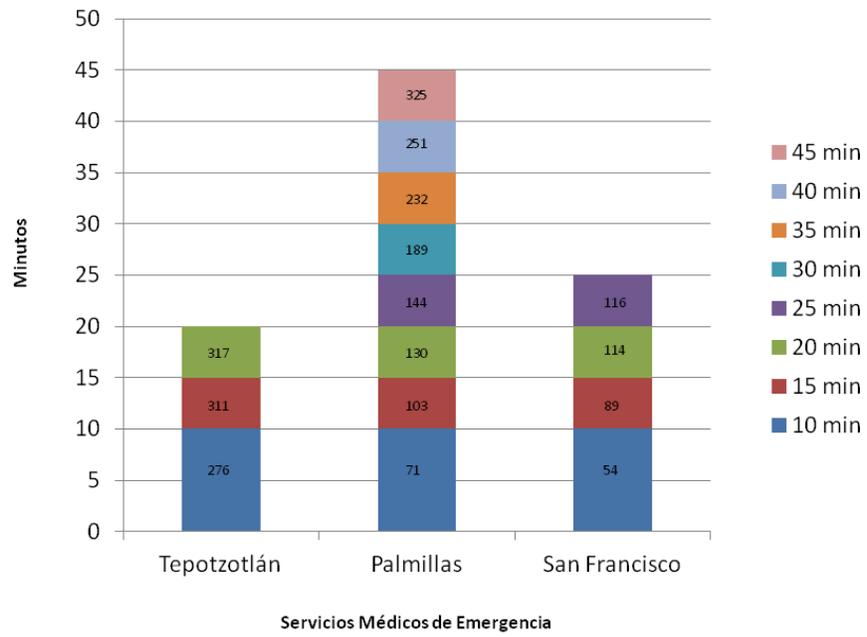


Figura 16 Cantidad de tramos cubiertos por los SME ubicados en la autopista México-Querétaro

Fuente: Elaboración propia basada en los resultados del análisis usando ArcMap

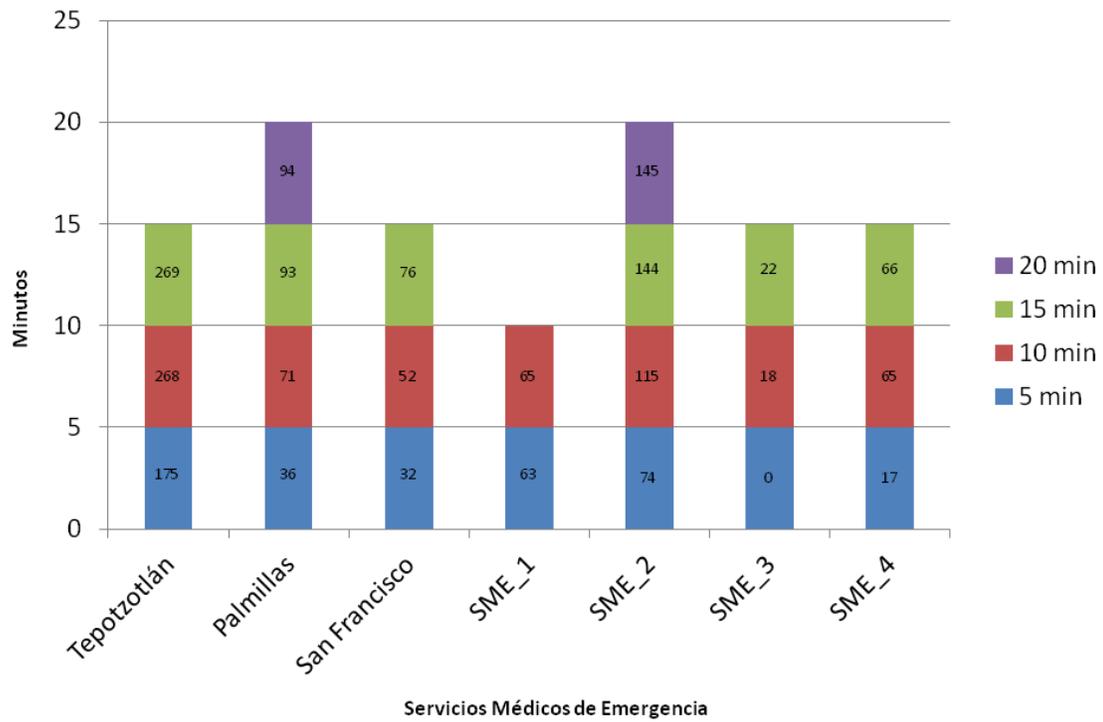


Figura 17 Cantidad de tramos cubiertos por la ubicación propuestos de los SME en la autopista México-Querétaro

Fuente: Elaboración propia basada en los resultados del análisis usando ArcMap

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

Para resolver el problema de la ubicación de servicios de emergencia en el tramo carretero México - Querétaro se utilizó el modelo que ubica servicios de emergencia y que es resultado de una mejora del modelo MCLP o Maximal Coverage Location Problem en el año 2010. La importancia de usar un modelo que da como resultado soluciones exactas y que además tiene la ventaja de utilizar un Sistema de Información Geográfica para generar diversos escenarios, así como cambios en los parámetros del mismo, es sin duda una de las aportaciones de esa investigación.

La ubicación de servicios en espacios geográficos no es una tarea fácil, para los tomadores de decisión, debe implicar un análisis que se complementa con diversos enfoques de disciplinas como la Geografía, Ingeniería Civil, Política, Medio Ambiente, Estadística, por mencionar algunas. Al realizar este trabajo se han dejado a un lado algunas consideraciones como el costo que tendría ubicar los servicios médicos de emergencia, las temporadas en donde son ubicados más servicios para atender a los usuarios, especialmente en periodo vacacional o el llamado “fin de semana largo”. También contar con más datos acerca de la accidentabilidad en el tramo ayudaría a conocer el comportamiento de los accidentes en carretera, el cual se ha llevado a términos epidemiológicos.

Las políticas públicas que impulsan el desarrollo económico, social, o del territorio en el país, deben responder a un análisis que involucre el conocimiento de la teoría de localización así como de un diagnóstico real, del espacio geográfico. En la gran mayoría de las ocasiones, la solución óptima es en realidad una utopía, por la necesidad de integrar diversos criterios que difícilmente no se contraponen. Sin embargo, es de gran utilidad si se desea una mejor toma de decisiones.

Siglas y Abreviaturas

CAPUFE: Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos

CENAPRA: Centro Nacional para la Prevención de Accidentes

CETRAVI: Centro de Transporte y Vialidad

IMESEVI: Instituto Mexicano para la Seguridad Vial

INEGI: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática

OMS: Organización Mundial de la Salud

OPS: Organización Panamericana de la Salud

PIB: Producto Interno Bruto

RAAC: Programas de fomento y participación ciudadana en el tema de seguridad vial

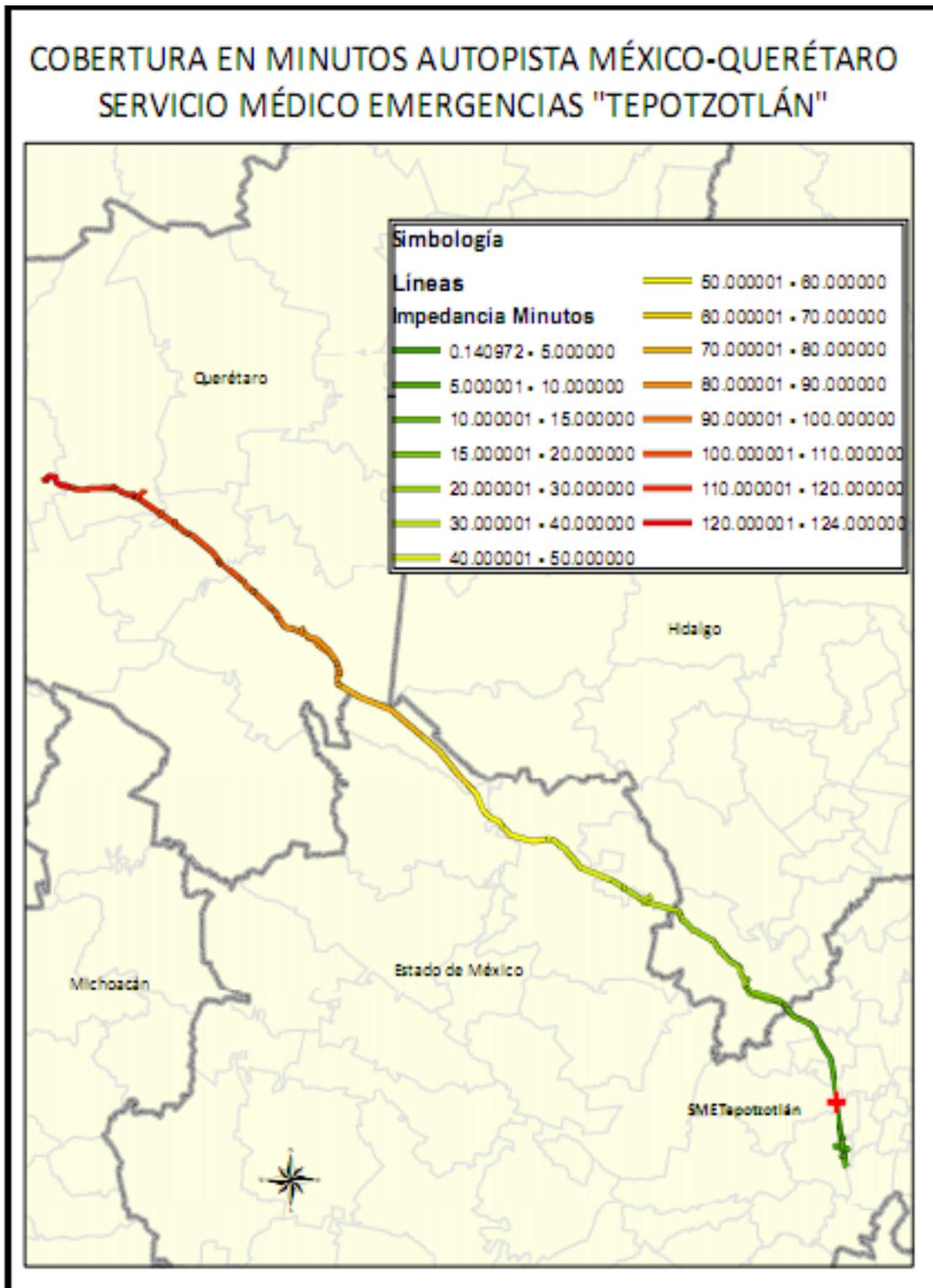
SATRAC: Sistema de Atención al Trauma

SCT: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

SSA: Secretaría de Salud

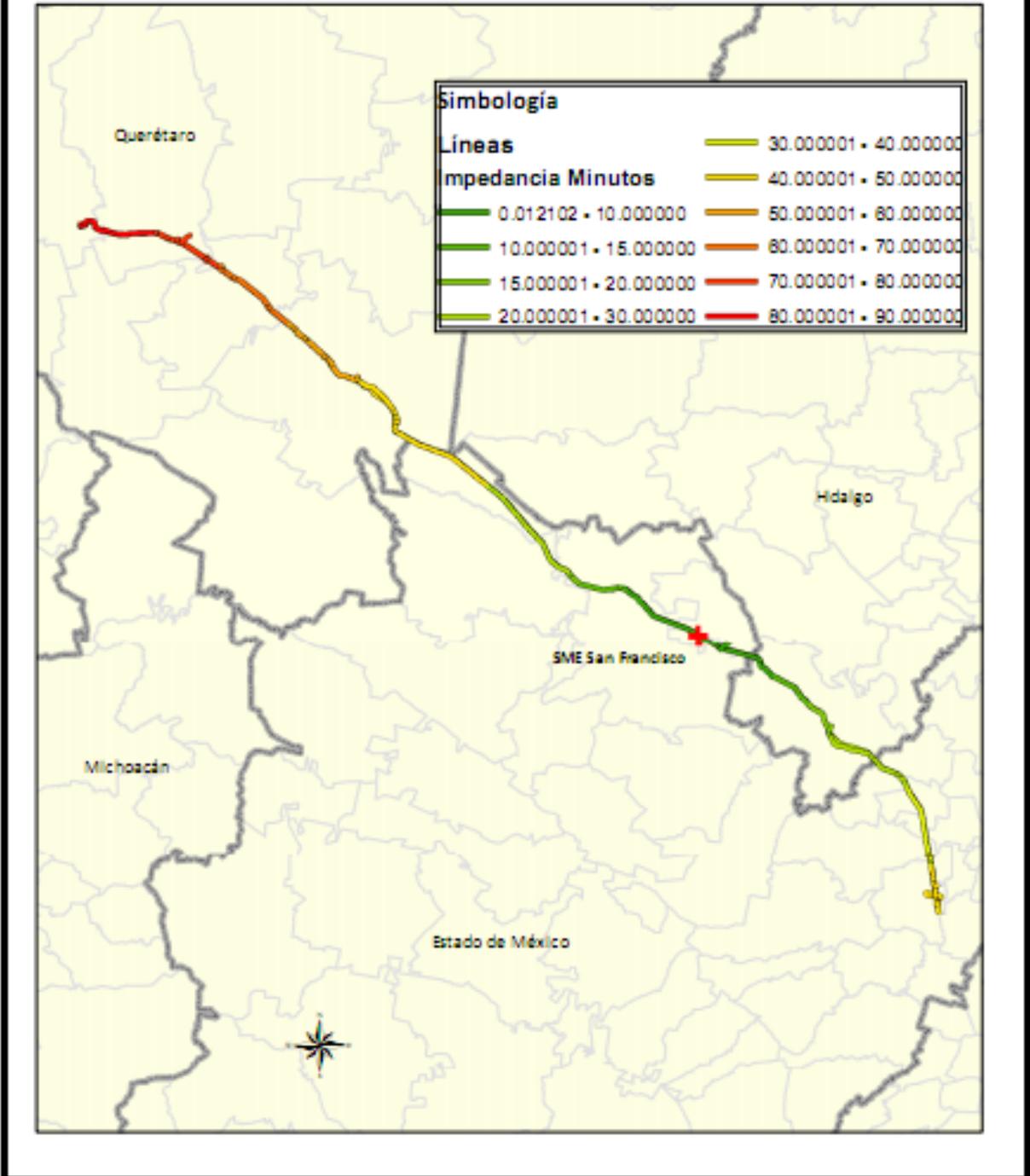
TUM: Técnico en Urgencias Médicas

Anexos



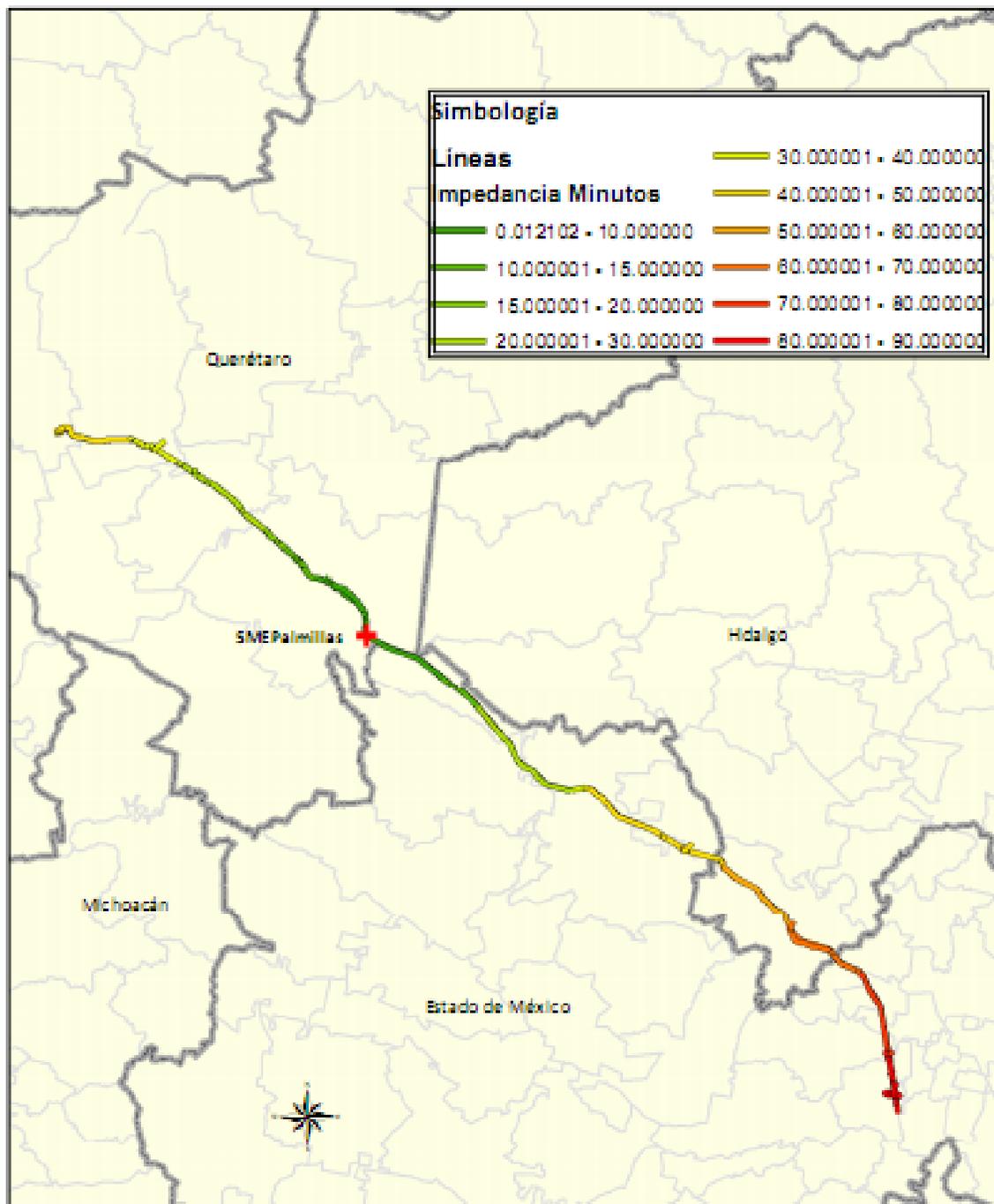
Mapa 1

COBERTURA EN MINUTOS AUTOPISTA MÉXICO-QUERÉTARO SERVICIO MÉDICO EMERGENCIAS "SAN FRANCISCO"



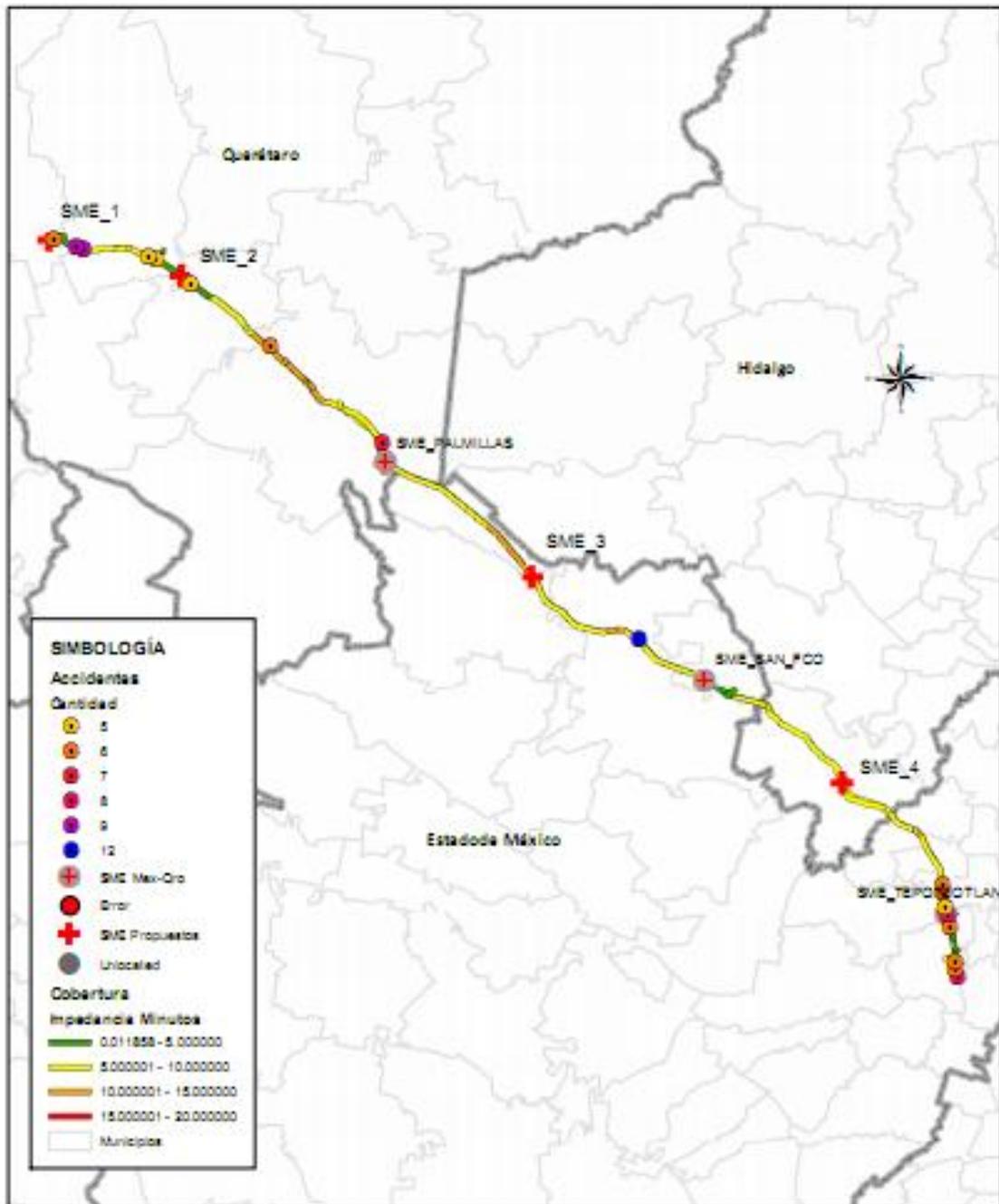
Mapa 2

COBERTURA EN MINUTOS AUTOPISTA MÉXICO-QUERÉTARO SERVICIO MÉDICO EMERGENCIAS "PALMILLAS"



Mapa 3

PROPUESTA DE LA UBICACIÓN DE LOS SERVICIOS MÉDICOS DE EMERGENCIA EN LA AUTOPISTA MÉXICO-QUERÉTARO CASO ACCIDENTES DEL 2007



Mapa 5

Referencias

1. Vini Indriasari, et al., *Maximal service area problem for optimal siting of emergency facilities*. International Journal of Geographical Information Science, 2010. **24**(2): p. 213-230.
2. D. Bartels, et al., *Incidence of road injuries in Mexico: country report*. Injury Control and Safety Promotion, 2010.
3. Pereira Moreira, R., *Evaluación de Medidas para Reducir los Accidentes de Tráfico*. Departamento de Fundamentos del Análisis Económico. Universidad de Vigo. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de Vigo. Campus de Lagoas-Marcosende.
4. Secretaría de Salud, *Programa Nacional de Salud 2007-2012*. 2007: México. p. 188.
5. Arreola-Rissa C., et al., *Análisis de la mortalidad por accidentes viales en la ciudad de Monterrey. Qué hemos aprendido y estrategias a implementar*. TRAUMA, 2003. **6**: p. 4-14.
6. Real Academia Española. *Diccionario de la Lengua Española*-. Vigésima segunda edición. 2011; Available from: http://buscon.rae.es/drae/?type=3&val=EMERGENCIA&val_aux=&origen=RE_DRAE.
7. Felder Stefan and Brinkmann Henrik, *Spatial allocation of emergency medical services: minimising the death rate or providing equal access?* Regional Science and Urban Economics, 2002. **32**: p. 27-45.
8. Ali M. , Miyoshi C. , and Ushijima H., *Emergency medical services in Islamabad, Pakistan: a public-private partnership*. Public Health, 2006. **120**: p. 50-57.
9. Lira Villavicencio M., *Response times in paramedic ambulance service priority 1 and 2 emergencies*. Emergencias, 2008. **20**: p. 316-321.
10. Blackwell H. Thomas and Kaufman S. Jay, *Response Time Effectiveness: Comparison of Response Time and Survival in a Urban Emergency Medical Services System*. Response Time, 2001: p. 288-295.
11. Brodsky, H., *Delay in Ambulances Dispatch to Road Accidents*. American Journal of Public Health, 1992. **82**: p. 873-875.
12. Swor Cone, *Emergency Medical Advanced Life Support Response Times: Lots of Heat, Little Light*. Academic Emergency Medicine, 2002. **9**: p. 320-321.
13. González P., R., et al., *Improving Rural Emergency Medical Service Response Time with Global Positioning System Navigation*. trauma Injury, Infection, and Critical Care, 2009. **67**: p. 899-902.
14. Sánchez-Mangas Rocío, et al., *The probability of death in road traffic accidents. How important is a quick medical response?* Accident Analysis & Prevention, 2010. **42**: p. 1050.
15. Arnold J. L., *International Emergency Medicine and the Recent Development of Emergency Medicine Worldwide*. Annals of Emergency Medicine, 1999: p. 97-103.
16. Fraga-Sastrías, J.M., et al., *Sistemas médicos de emergencia en México. Una perspectiva prehospitalaria*. Archivos de Medicina de Urgencia de México, 2010. **1**: p. 25-34.

17. Luna González Laura, *Los Sistemas de Información Geográfica: Una alternativa para el análisis socioespacial de los accidentes de tránsito vehicular en carreteras. Propuesta Metodológica*, in *Facultad de Filosofía y Letras*. 1997, UNAM: Ciudad Universitaria.
18. Ricardez Cabrera Mauricio M., *Diagnóstico Espacial de los Accidentes de Tránsito en Municipios Urbanos de México en 1990*, in *Facultad de Filosofía y Letras Colegio de Geografía*. 1998, UNAM: Ciudad Univerditaria. p. 13.
19. Ricardez Cabrera, M.M., *Diagnóstico Espacial de los Accidentes de Tránsito en Municipios Urbanos de México en 1990*, Facultad de Filosofía y Letras Colegio de Geografía UNAM, Editor. 1998. p. 13.
20. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Accidentes de tránsito terrestre en zonas urbanas y suburbanas*. 2011 [cited 2011; Available from: http://www.inegi.org.mx/lib/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?c=13159].
21. Insurance Institute for Highway Safety Highway Loss Data Institute. *Fatality Facts*. 1996-2011 [cited 2011 Diciembre 23]; Available from: http://www.iihs.org/research/fatality_facts_2009/default.html.
22. Clarke, D.D., et al., *Killer crashes: Fatal road traffic accidents in the UK*. Accident Analysis and Prevention, 2010. **42**: p. 764-770.
23. Bartels, D., et al., *Incidence of road injuries in Mexico: country report*. Injury Control and Safety Promotion, 2010.
24. Smolensky, M.H., et al., *Sleep disorders, medical conditions, and road accident risk*. Accident Analysis & Prevention, 2011. **43**: p. 533-548.
25. Rowdena, P., et al., *The relative impact of work-related stress, life stress and driving environment stress on driving outcomes*. Accident Analysis & Prevention, 2011. **43**: p. 1332-1340.
26. Chías Becerril, L., *Seminario Transporte y Organización del Territorio*, G. Instituto de, Editor. 2011: UNAM México.
27. Espinoza Jiménez, R., *Localización de los Servicios de Emergencia en Carreteras. Caso Estudio: Autopista México - Querétaro* in *Facultad de Ingeniería*. 2003, Universidad Nacional Autónoma de México: México. p. 93.
28. Organización Mundial de la Salud, *10 Facts on Global Road Safety*. World Health Organization (WHO), 2011.
29. Instituto Mexicano del Transporte IMT. *Seguridad Vial*. 2011; Available from: http://www.imt.mx/SitioIMT/ServEspecializado/ServTecnologico/frmSeguridadVial.aspx?Pagina=482&Ruta=Seguridad%20vial/Servicios%20Tecnol%C3%B3gicos&ID_CON_Menu=454.
30. Secretaría de Salud and CONAPRA, *Perfil Nacional México. Situación de la Seguridad Vial en México Reporte Estadístico*, 2011: p. 12-15.
31. CAPUFE, C.y.P.F. *Servicios Carreteros*. 2010; Available from: <http://www.capufe.gob.mx/portal/site/wwwCapufe/menuitem.c7c51f4d931a9ce05a034bd7316d8a0c/>.
32. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 2010; Available from: <http://www.sct.gob.mx/>.
33. Organización Mundial de la Salud (OMS), *Plan Mundial para el Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020*. 2011, World Health Organization (WHO). p. 25.

34. Organización Mundial de la Salud (OMS), *10 Facts on Global Road Safety*. World Health Organization (WHO), 2011.
35. Haddon William, *The Changig Approach to the Epidemiology, Prevention and Ameloration of Trauma: The Transition to Approaches Etiologically rather than Descriptively Based*. Phenomena of Trauma, 1968. **58**(8).
36. SWOV Institute for Road Safety Research. *Advancing Sustainable Safety*. 2011; Available from: <http://www.sustainablesafety.nl/>.
37. SEI. *Vision Zero in Sweden*. 2011; Available from: http://www.vv.se/templates/page3_16644.aspx.
38. Via Sicura. *Federal Action Programme for Greater Road Safety*. 2011; Available from: <http://www.astra.admin.ch/themen/verkehrssicherheit/00236/index.html?lang=en>.
39. Nusin Coskun and Rizvan Erol, *An Optimization Model for Locating and Sizing Emergency Medical Service Stations*. Medical System, 2010. **34**: p. 43-49.
40. Estadísticas de Transporte de América del Norte. *Estadísticas del Transporte de América del Norte*
Base de Datos. 2012; Available from: <http://nats.sct.gob.mx/nats/sys/tables.jsp?i=2&id=24>.
41. Fragniere Emmanuel and Gondzio Jacek, *Optimization Modeling Languages*. En: Handbook of Applied Optimization, 2002: p. 994.
42. Nickel, S. and J. Puerto, *Location Theory A Unified Approach*. 2005, Alemania: Springer.
43. Jensen, P.A. and J.F. Bard, *Operations Research Models and Methods*, in *Chapter I: Problem Solving with Operations Research* Wiley, Editor. 2003. p. 3.
44. Rao, S.S., *Engineering Optimization Theory and Practice*. 2009, USA: Wiley-Interscience Publication. 903.
45. Nocedal Jorge and Wright Stephen J., *Numerical Optimization*,. 2000: Springer
46. J. R Dennis, J. and Robert B. Schnabel, *Numerical Methods for Unconstrained Optimization an Nonlinear Equations*. 1996: SIAM.
47. Farahani, R.Z., M. SteadieSeifi, and N. Asgari, *Multiple criteria facility location problems: A survey*. Applied Mathematical Modelling, 2010. **34**: p. 1689–1709.
48. Weber, A., *Über den Standort der Industrien, Tübingen. Theory of the Location of Industries*. University of Chicago Press, 1909.
49. Pardalos M. Panos and Resende Mauricio G. C., *Handbook of Applied Optimization*. 2002: Oxford. 1077.
50. Daskin, M.S., *Network and discrete location: models, algorithms, and applications*. Business & Economics, ed. Willey. 1955. 498.
51. Araneda Martinez, R.H. and R.J. Moroga Suazo, *La decision de localización en la Cadena de Suministro*, in *Ingeniería Industria*. 2005: Universidad del Bio-Bio, Concepcion, Chile.
52. Zanjirani Farahani, R., M. SteadieSeifi, and N. Asgari, *Multiple criteria facility location problems: A survey*. Applied Mathematical Modelling 2010. **34**: p. 1689–1709.
53. ESRI. *What is GIS?* 2011; Available from: <http://www.esri.com/what-is-gis/index.html>.

54. Bell, N. and N. Schuurman, *GIS and Injury Prevention and Control: History, Challenges, and Opportunities*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2010. 7(1660-4601): p. 1002-1017.
55. Reséndiz López, H.D., L. Chias Becerril, and M. Hajar Medina, *Puentes peatonales: ¿Infraestructura para la seguridad de los peatones? Puente peatonales y atropellamientos en la CD. de México D.F.* p. 9-10.
56. Google. *Buscador de google*. 2010; Available from: <https://www.google.com.mx>.
57. Instituto Nacional de Geografía y Estadística. *Consulta Interactiva de Datos*. 2010; Available from: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/cubos/>.
58. ESRI, *ArcMap 10.0*. 1999-2010: Estados Unidos de Norte América.
59. Lara Rosano, F., *Métodos y modelos de la complejidad social*. 2011, Instituto de Investigaciones Sociales UNAM.
60. esri. *Mapping and Analysis for Understanding our World*. 2010; Available from: <http://www.esri.com/software/arcgis>.