



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

LOCALIZACIÓN DE SERVICIOS DE EMERGENCIAS PARA ATENCIÓN DE ACCIDENTES  
DE TRÁNSITO EN LOS MUNICIPIOS: PUEBLA, SAN ANDRÉS CHOLULA, SAN PEDRO  
CHOLULA Y CUAUTLANCINGO DEL ESTADO DE PUEBLA

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

PRESENTA:  
JOSÉ CASTRO RAMÍREZ

TUTOR  
RICARDO ACEVES GARCÍA, FACULTAD DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, CDMX, Noviembre 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: **M. I. Rivera Colmenero José Antonio**

Secretario: **Dr. Del Moral Dávila Manuel**

Vocal: **Dr. Aceves García Ricardo**

1<sup>er.</sup> Suplente: **M. I. Reséndiz López Héctor Daniel**

2<sup>do.</sup> Suplente: **Dra. Alarcón Bernal Zaida Estefanía**

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: FACULTAD DE INGENIERÍA

**TUTOR DE TESIS:**

**RICARDO ACEVES GARCÍA**

-----  
**FIRMA**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios: por la salud, bienestar y mantener conmigo a mi familia.*

*A mis padres, hermanos y adorados sobrinos por todo su apoyo, comprensión, motivación y cariño brindado durante toda mi vida.*

*Al Dr. Ricardo Aceves García por su colaboración, orientación, enseñanzas y tiempo dedicado para la revisión de la presente investigación. De igual manera a todos los profesores que fueron parte de mi formación académica y profesional, sin sus enseñanzas y consejos no sería la persona que ahora soy, no menciono algún nombre de ellos por recelo a omitir a alguno de ellos; siempre estaré agradecido por sus enseñanzas y consejos brindados durante mi estancia en el posgrado.*

*A la Dra. Zaida Alarcón Bernal y M. en C. Juan Carlos Aguilar Franco por su asesoría en la programación en GAMS del algoritmo propuesto para la solución de caso de estudio.*

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

*Al Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes por la facilitación de datos de servicios de AMP utilizados en esta investigación.*

*A Maricela, Adriana, Karla, Fidel, Omar y Jazon por su compañerismo y brindarme su amistad en esta etapa.*

*Al Ing. Aarón García López por su amistad y asistencia técnica en la instalación del software utilizado en la presente investigación.*

*A Mirna Sánchez por acompañarme durante el desarrollo del presente trabajo y marcar una gran etapa de mi vida.*

*A Yasmín Rodríguez por el apoyo y formar parte de esta nueva historia en mi vida.*



## Abreviaturas y acrónimos utilizados

AMP	Atención Médica Prehospitalaria
C5	Centro de Control, Comando, Comunicaciones y Cómputo
CEVECE	Centro Estatal de Vigilancia Epidemiológica y Control de Enfermedades
COEPRA	Consejos Estatales para la Prevención de Accidentes
CONAPRA	Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes
CRMP	Cruz Roja Mexicana Puebla
CRT	Cruz Roja de Tijuana
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
GAMS	General Algebraic Modeling System
OEL	Observatorios Estatales de Lesiones
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONL	Observatorio Nacional de Lesiones
PHTLS	Prehospital Trauma Life Support
PIB	Producto Interno Bruto
RAVMex	Registro de Accidentes Viales en México
SEM	Sistemas de Emergencias Médicas
SME	Servicios Médicos de Emergencia
SIG	Sistema de Información Geográfica
SSEP	Secretaría de Salud del Estado de Puebla
SUMA	Sistema de Urgencias Médicas Avanzadas
TUM	Técnico en Urgencias Médicas
ZMEP	Zona Metropolitana del Estado de Puebla



## CONTENIDO

<b>PRESENTACIÓN</b> .....	1
Objetivo General.....	1
Objetivos Particulares.....	1
Antecedentes .....	1
<b>CAPÍTULO I. PROBLEMÁTICA</b> .....	5
1.1 Identificación del Problema.....	5
1.2 Justificación del trabajo de investigación.....	7
1.3 Delimitación de la zona de estudio.....	10
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b> .....	15
2.1 Estado del arte .....	15
2.1.1 Caso Fayetteville (Carolina del Norte), Estados Unidos .....	15
2.1.2 Caso Surakarta, Indonesia.....	17
2.1.3 Caso Tijuana, México .....	18
2.1.4 Caso Sor Trondelag, Noruega.....	20
2.2 Modelos de localización de instalaciones .....	21
2.3 Modelos de cobertura para ubicación y planificación de instalaciones de emergencia .....	24
2.3.1 Modelo de cobertura de conjuntos de instalaciones (LSCP).....	26
2.3.2 Problema de Localización con Cobertura Máxima (MCLP).....	27
2.3.3 Modelo de Asignación de Equipos en Tándem (TEAM) .....	29
2.3.4 Modelo MCLP multiobjetivo (HOSC).....	29
2.3.5 Modelos BACOP1 & BACOP2 multiobjetivo .....	30
2.3.6 Modelo doble estándar (DSM).....	30
2.3.7 Problema de localización de cobertura máxima esperada (MEXCLP).....	32
2.4 Estrategia de solución .....	34
<b>CAPÍTULO III. CASO DE ESTUDIO</b> .....	35
3.1 Atención Médica Prehospitalaria en el Estado de Puebla.....	35
3.2 Situación prevaleciente de accidentes de tránsito en la zona de estudio .....	39
3.3 Metodología para levantamiento de datos de velocidad de operación .....	54
3.3.1 Preparación de instrumentos para levantamiento de información en campo .....	54
3.3.2 Grabación de recorridos realizados.....	57
3.4 Caracterización de red vial.....	59



3.4.1 Red vial en Horario Valle.....	62
3.4.2 Red vial en Horario Pico.....	64
3.5 Instalaciones factibles para localización de ambulancias .....	66
3.6 Modelo matemático utilizado para solución de la problemática .....	72
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS .....</b>	<b>75</b>
4.1 Horario Valle .....	76
4.1 Horario Pico .....	84
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>92</b>
5.1 Conclusiones .....	92
5.2 Recomendaciones .....	94
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>96</b>

## MAPAS

Mapa 1 Accidentes de tránsito en el Estado de Puebla registrados en el RAVMex .....	11
Mapa 2 Ubicación de zona de estudio.....	13
Mapa 3 Accidentes registrados en la zona de estudio .....	41
Mapa 4 Accidentes de tránsito en intersecciones .....	45
Mapa 5 Accidentes de tránsito en curvas.....	47
Mapa 6 Accidentes de tránsito en segmentos rectos .....	48
Mapa 7 Mapa de calor de siniestros viales registrados en la zona de estudio.....	51
Mapa 8 Mapa de servicios vs calor de siniestros viales registrados en la zona de estudio .....	52
Mapa 9 Recorridos realizados en estudio de velocidades dentro de la zona de estudio ...	59
Mapa 10 Red vial diseñada para la zona de estudio.....	60
Mapa 11 Velocidades semilla dentro de horario valle en la zona de estudio .....	62
Mapa 12 Velocidades extendidas en horario valle en la zona de estudio .....	63
Mapa 13 Velocidades semilla dentro de horario pico en la zona de estudio.....	64
Mapa 14 Velocidades extendidas en horario pico en la zona de estudio .....	65
Mapa 15 Asignación de ambulancias en la zona de estudio.....	67
Mapa 16 Oferta de servicios médicos públicos y privados en la zona de estudio.....	68
Mapa 17 Clusters de instalaciones médicas en la zona de estudio .....	69
Mapa 18 Instalaciones médicas factibles para ubicación de ambulancias.....	70
Mapa 19 Cobertura: 5 minutos en hora valle.....	78
Mapa 20 Cobertura: 6 minutos en hora valle.....	78
Mapa 21 Cobertura: 7 minutos en hora valle.....	79
Mapa 22 Cobertura: 8 minutos en hora valle.....	79
Mapa 23 Cobertura: 9 minutos en hora valle.....	80
Mapa 24 Cobertura: 10 minutos en hora valle.....	80
Mapa 25 Cobertura: 11 minutos en hora valle.....	81
Mapa 26 Cobertura: 12 minutos en hora valle.....	81

## CONTENIDO



Mapa 27 Cobertura: 13 minutos en hora valle.....	82
Mapa 28 Cobertura: 14 minutos en hora valle.....	82
Mapa 29 Cobertura: 5 minutos en hora pico .....	85
Mapa 30 Cobertura: 6 minutos en hora pico .....	86
Mapa 31 Cobertura: 7 minutos en hora pico .....	86
Mapa 32 Cobertura: 8 minutos en hora pico .....	87
Mapa 33 Cobertura: 9 minutos en hora pico .....	87
Mapa 34 Cobertura: 10 minutos en hora pico .....	88
Mapa 35 Cobertura: 11 minutos en hora pico .....	88
Mapa 36 Cobertura: 12 minutos en hora pico .....	89
Mapa 37 Cobertura: 13 minutos en hora pico .....	89
Mapa 38 Cobertura: 14 minutos en hora pico .....	90

### DIAGRAMAS

Diagrama 1 Estrategia de solución para el caso de estudio.....	34
Diagrama 2 Protocolo de atención para unidades vehiculares de SUMA .....	38

### FIGURAS

Figura 1 Ilustración del LSCP. D1 a D12 son puntos de demanda mientras S1 a S4 son instalaciones de emergencia. Un punto de demanda está cubierto por una instalación si la distancia entre el punto de demanda y la instalación está dentro de $r$ .....	27
Figura 2 Ilustración del problema de ubicación de doble cobertura. Las posiciones de los puntos de demanda y de los sitios potenciales son las mismas que las de la Fig. 1. Para maximizar las demandas cubiertas dos veces dentro de $r_1$ .....	32
Figura 3 Ambulancias terrestres y aéreas de SUMA.....	37
Figura 4 Aplicación móvil Oruxmaps .....	54
Figura 5 Menú Configuración global.....	55
Figura 6 Opción “Sensores”.....	55
Figura 7 Menú GPS.....	55
Figura 8 Menú Configuración global.....	56
Figura 9 Menú Tracks/Rutas .....	56
Figura 10 Aplicación GPS Test.....	57
Figura 11 Activación de GPS en el dispositivo móvil.....	57
Figura 12 Captación de señal GPS .....	57
Figura 13 Activación de GPS en aplicación Oruxmaps .....	58
Figura 14 Inicio de grabación .....	58
Figura 15 Codificación en GAMS del algoritmo propuesto.....	75
Figura 16 Ejemplo de áreas de servicio .....	76



## GRÁFICAS

Gráfica 1 Total de accidentes de tránsito en México.....	5
Gráfica 2 Distribución de defunciones por tupo de usuario y edad .....	6
Gráfica 3 Causas de accidentes de tránsito en México, 2015.....	8
Gráfica 4 Registro histórico de accidentes de tránsito en el Estado de Puebla .....	12
Gráfica 5 Registro histórico de accidentes de tránsito en zona de estudio y total registrado en el Estado de Puebla.....	14
Gráfica 6 Distribución de accidentes de tránsito por día .....	43
Gráfica 7 Distribución horaria de accidentes de tránsito .....	43
Gráfica 8 Distribución mensual de accidentes de tránsito.....	44
Gráfica 9 Tipo de accidente de tránsito registrado .....	44
Gráfica 10 Lugar en donde ocurrió el accidente de tránsito.....	45
Gráfica 11 Tipo de superficie de rodamiento donde ocurrió el accidente de tránsito.....	48
Gráfica 12 Estado físico de carpeta de rodamiento donde ocurrió el accidente de tránsito .....	49
Gráfica 13 Condiciones climatológicas cuando ocurrió el accidente de tránsito .....	49
Gráfica 14 Tipo de zona donde ocurrió el accidente de tránsito .....	49
Gráfica 15 Registro histórico de servicios realizados por el SUMA en el Estado de Puebla .....	53



## PRESENTACIÓN

### Objetivo General

Proponer ubicación para las ambulancias administradas por la Secretaría de Salud del Estado de Puebla para los municipios de Puebla, Cuautlancingo, San Pedro Cholula y San Andrés Cholula, con la finalidad de disminuir el tiempo de llegada a los sitios en donde se presente algún accidente de tránsito, además mejorar la cobertura geográfica de los servicios de emergencia en dichos municipios.

### Objetivos Particulares.

- I. Conocer la situación histórica y prevaeciente de los accidentes viales en el país y en la zona de estudio.
- II. Realizar propuestas de ubicación de las ambulancias administradas por la Secretaría de Salud del Estado de Puebla.
- III. Mejorar la cobertura de los servicios de emergencia (ambulancias) en la zona de estudio.
- IV. Demostrar que mediante algoritmos de localización de instalaciones se pueden emplazar los servicios de emergencia para reducir los tiempos de llegada a los lugares en donde se soliciten dichos servicios.

### Antecedentes

El concepto de ambulancia clásicamente se define como un vehículo destinado al traslado de enfermos y heridos (Martinez, 2006). El nombre es de origen francés (1800-1810) y éste a su vez proviene del latín “ambulans” que se puede interpretar como caminar hacia el hospital. La historia de la ambulancia inicia con la utilización de hamacas, carros con hamacas y caballos con literas, los heridos también eran trasladados atados a caballos, mulas o camellos; hasta entonces, las llamadas ambulancias cumplían únicamente con el propósito original de trasladar los enfermos al hospital.

Actualmente, de forma oficial para México, la ambulancia se define como (Diario Oficial de la Federación, Norma Oficial Mexicana NOM-034-SSA3-2013, Regulación de los servicios de salud. Atención Médica Prehospitalaria, 2014): “unidad móvil,



aérea, marítima o terrestre, destinada para la atención médica prehospitalaria, diseñada y construida para proveer comodidad y seguridad en la atención médica, la cual consta de una cabina para el operador de la ambulancia o piloto, copiloto y un compartimento destinado para la atención del paciente, personal, equipo médico e insumos necesarios”.

Algunos acontecimientos históricos del uso de los servicios de ambulancias son los siguientes (Martínez, 2001):

- En 1797 el doctor Jean Dominique Larrey, miembro de los ejércitos napoleónicos cambió el concepto de ambulancia, al convertirla en un vehículo que trasladaba a los médicos con su instrumental al campo de batalla; él la denominó “ambulancia aérea” debido a que los equipos médicos trabajaban cerca de la “artillería aérea” (Ministerio de Educación y Ciencia, 2007).
- Los primeros servicios de ambulancia para la atención de la población civil se iniciaron en 1865 en Cincinnati y en 1869 en Nueva York en vehículos tirados por caballos prácticamente se limitaban al traslado de pacientes al hospital.
- Los primeros traslados por aire de lesionados se realizaron a través de globos aerostáticos en 1870.
- La primera ambulancia motorizada dio servicio por primera vez en 1899 en la ciudad de Chicago (Estados Unidos), se trataba de un vehículo muy pesado que avanzaba a la velocidad de unos 20 kms por hora.
- En 1920 en la antigua Unión Soviética se diseñó un servicio de atención prehospitalaria a domicilio.
- En 1928, los australianos diseñaron una ambulancia aérea que contaba con una tripulación conformada por un piloto, un médico y una enfermera, el vehículo tenía espacio para colocar un enfermo en camilla.
- En 1933 el primer traslado por medios aéreos para un civil (un paciente con peritonitis) se realizó en el Reino Unido.
- En la Unión Soviética, Moiseiev publicó un artículo sobre un sistema de atención prehospitalaria para pacientes con shock y/o falla cardíaca en 1962.



- En 1966. Pantridge diseñó el primer sistema para la atención prehospitalaria de la cardiopatía isquémica.
- En 1968, en los Estados Unidos de América surgió la primera unidad móvil de terapia intensiva prehospitalaria dirigida a la atención de todo tipo de pacientes en estado crítico, con personal paramédico entrenado para esta clase de eventos.
- En México el 21 de febrero de 1910 se fundó la Cruz Roja Mexicana.

El reto general para los Servicios Médicos de Emergencia (SME) es proporcionar el mejor servicio posible al público para reducir los niveles de mortalidad en casos de siniestro viales graves. Para lograr SME de alta calidad, la planeación en dichos servicios es de vital importancia. Desde mediados de los años sesentas del siglo pasado, los SME han sido estudiados desde diferentes metodologías de operación, así mismo, se han publicado numerosos artículos sobre localización de ambulancias, asignación de ambulancias, despacho de vehículos, redistribución de ambulancias y evaluación de los SME; los cuales se ha centrado en aspectos estratégicos, tácticos y operacionales.

El principal problema estratégico (Leknes, Aartun, & Andersson, 2016) ha sido la ubicación de ambulancias. Los problemas tácticos dimensionan el tamaño de la flota de ambulancias y su asignación a las estaciones de servicio. Entre los problemas operacionales que se han investigado están las ambulancias que deben ser enviadas a una llamada y la reasignación de ambulancias para obtener la mayor cobertura posible en una región.

Los primeros modelos de localización de ambulancias se centraron en maximizar la demanda cubierta dentro de intervalo de tiempo de respuesta dado (Leknes, Aartun, & Andersson, 2016), minimizando el tiempo de respuesta promedio, o minimizando el número de ambulancias necesarias para cubrir toda la demanda dentro de un umbral dado. Los modelos que minimizan el tiempo de respuesta promedio también se conocen como problemas P-Medianos. En todos estos modelos sólo puede ubicarse una ambulancia en una zona específica. Estos problemas de cobertura y



P-Mediana consideraban la situación estática, es decir, si se envía una ambulancia, el área inicialmente cubierta por esta ambulancia se queda sin cobertura. Como respuesta a esta falta de cobertura, los modelos posteriores maximizaron la demanda cubierta por dos o más ambulancias. Los modelos de doble cubierta compensan en cierta medida la posible indisponibilidad de una ambulancia, pero el objetivo sigue siendo maximizar la demanda que se puede alcanzar dentro de cierto umbral.



## CAPÍTULO I. PROBLEMÁTICA

### 1.1 Identificación del Problema.

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2015) afirma que los accidentes de tránsito constituyen un grave problema de salud pública, las lesiones por accidentes de tránsito son un problema de desarrollo: ya que los países de ingresos bajos y medianos pierden aproximadamente el 3% del PIB como resultado de los accidentes de tránsito. Además, los accidentes viales son la principal causa de muerte a nivel mundial entre jóvenes de edades comprendidas entre los 15 y los 29 años. Los accidentes de tránsito causan 1.24 millones de muertes al año, y entre 20 y 50 millones de personas sufren lesiones graves. El 49% de todas las muertes en las carreteras del mundo están entre los usuarios más vulnerables: peatones, motociclistas y ciclistas.

En México, el panorama es similar, con base a estimaciones realizadas por el CONAPRA se estimó que durante el año 2014 el costo de las lesiones, discapacidad y muertes por causa de accidentes de tránsito supera 120 mil millones de pesos anuales (CEVECE, 2014), además se registraron 15,886 defunciones a causa de accidentes de tránsito (Gráfica 1). Durante el periodo de los años 2010-2014 el promedio de accidentes registrados al año es de 396,254, de los cuales se derivaron 153,352 personas lesionadas y 16,404 perdieron la vida.



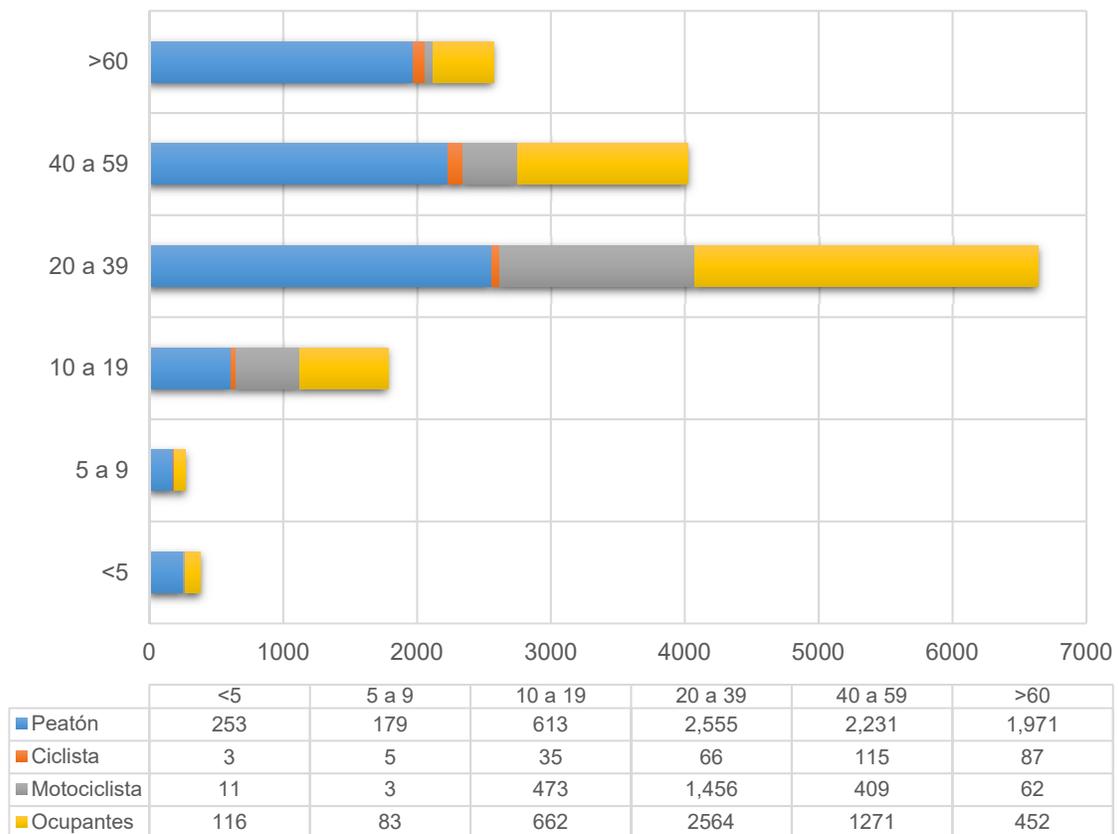
Gráfica 1 Total de accidentes de tránsito en México

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en (CONAPRA, 2015)



Para el mismo año, el CONAPRA reportó que los accidentes de tránsito representan para la población en el rango de 20 a 39 años de edad la principal causa de muerte (ver Gráfica 2), asimismo, el 67.16% de las personas fallecidas en el rango de edad anterior corresponden a los usuarios más vulnerables de las vialidades: 47.77%, 1.98% y 15.40% para los peatones, ciclistas y motociclistas, respectivamente. Es importante mencionar que el porcentaje de peatones que mueren en un siniestro de tránsito es proporcional al número de los ocupantes del vehículo involucrado en el accidente de tránsito.

Distribución de las defunciones por tipo de usuario y edad, 2014



*Gráfica 2 Distribución de defunciones por tipo de usuario y edad*  
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en (CONAPRA, 2015)

De acuerdo con la Base de Datos (Tabla 1) del INEGI, en México el número de muertes por concepto de accidentes de tránsito en vehículos para el periodo



comprendido en los años 2011 a 2014 se encuentra dentro de las primeras diez causas de muertes.

Defunciones por tipo de enfermedad en México								
	2011		2012		2013		2014	
	Enfermedad	Muertes	Enfermedad	Muertes	Enfermedad	Muertes	Enfermedad	Muertes
1	Enfermedades isquémicas del corazón	71,072	Diabetes mellitus	85,055	Diabetes mellitus	89,469	Diabetes mellitus	94,029
2	Diabetes mellitus	80,788	Enfermedades isquémicas del corazón	74,057	Enfermedades isquémicas del corazón	79,586	Enfermedades isquémicas del corazón	82,334
3	<b>Accidentes de tráfico de vehículos de motor</b>	<b>16,612</b>	Enfermedades cerebrovasculares	31,905	Enfermedades cerebrovasculares	32,762	Enfermedades cerebrovasculares	33,166
4	Enfermedad alcohólica del hígado	12,162	Agresiones	25,967	Agresiones	23,063	Agresiones	20,010
5	Enfermedades cerebrovasculares	31,235	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	18,532	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	20,490	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	19,715
6	Agresiones	27,213	<b>Accidentes de tráfico de vehículos de motor</b>	<b>17,098</b>	<b>Accidentes de tráfico de vehículos de motor</b>	<b>15,847</b>	<b>Accidentes de tráfico de vehículos de motor</b>	15,882
7	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	18,487	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	14,391	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	13,025	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	13,089
8	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	14,825	Enfermedad alcohólica del hígado	12,540	Enfermedad alcohólica del hígado	12,763	Insuficiencia renal	12,788
9	Dificultad respiratoria del recién nacido y otros trastornos respiratorios originados en el período perinatal	6,626	Insuficiencia renal	11,955	Insuficiencia renal	12,073	Enfermedad alcohólica del hígado	11,411
10	Insuficiencia renal	11,920	Malformaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas	9,414	Malformaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas	9,381	Malformaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas	9,569
	Total de muertes por enfermedad	590,693	Total de muertes por enfermedad	602,354	Total de muertes por enfermedad	623,599	Total de muertes por enfermedad	633,641

Tabla 1 Defunciones por tipo de enfermedad en México

Fuente: Elaboración propia, con base a Base de datos de defunciones del INEGI

## 1.2 Justificación del trabajo de investigación.

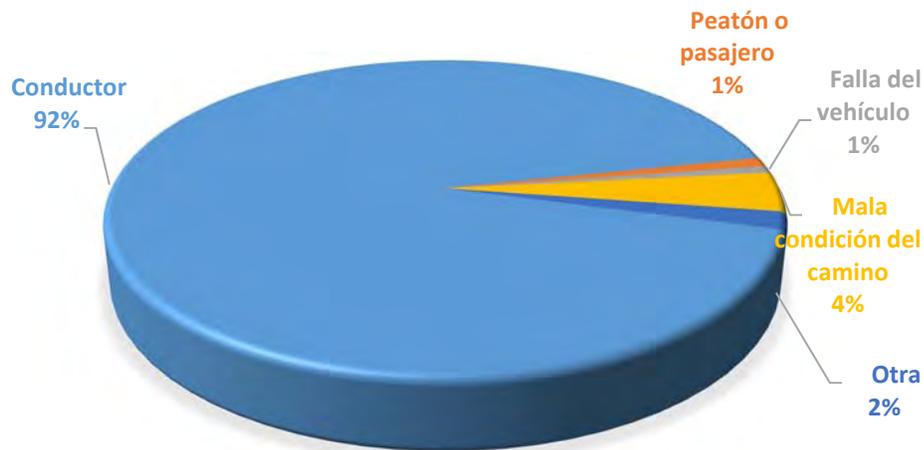
Por lo mencionado en el apartado anterior, los accidentes viales se consideran como un problema de seguridad y salud pública.



Existen diversos factores (Gráfica 3) que se ha identificado que intervienen en el número de accidentes viales, algunos de ellos son:

- Temporalidad (épocas del año)
- Tipo y comportamiento de usuario
- Las condiciones del camino
- Estado mecánico del vehículo
- Condiciones climatológicas

### CAUSAS DE ACCIDENTES DE TRÁNSITO 2015



Gráfica 3 Causas de accidentes de tránsito en México, 2015

Fuente: Elaboración propia, con información de Base de datos del INEGI

Por otra parte, en términos médicos, la muerte causada por algún tipo de traumatismo puede ocurrir dentro de 3 etapas (Contreras, 2006), las cuales son:

- Primera etapa: ocurre dentro de los primeros segundos o minutos después de que el accidente haya ocurrido (0-1 hr). En esta fase, ocurren alrededor del 50% de todas las muertes por traumatismos.
- Segunda etapa: se produce dentro de los primeros 60 minutos y hasta 4 horas después de que el accidente se había producido, el 30% de las personas heridas están en la segunda etapa llamada de mortalidad temprana.



- Tercera etapa: corresponde al 15% de los casos, que van desde 1 a 5 semanas y las muertes ocurren debido a una falla orgánica múltiple.

En servicios médicos existen diversos protocolos de actuación para atender la solicitud de “primer contacto” a personas siniestradas en la vía pública o domicilios particulares. Dichos protocolos consideran como punto de partida recomendaciones que se actualizan periódicamente basadas en la evidencia científica que tienen como referente la metodología propuesta por el protocolo PHTLS, Prehospital Trauma Life Support, (Robledo, 2012).

En particular el protocolo PHTLS y la evidencia científica, explican la existencia de un par de conceptos importantes dentro de la Atención Médica Prehospitalaria (AMP) que son: la “Hora Dorada”; la cual es el estándar de tiempo idóneo para la atención de los pacientes siniestrados (Cowley, 1976), es decir, corresponde al período que transcurre entre el momento en que es solicitado el servicio de AMP hasta que el personal de salud tiene el primer contacto con el paciente; durante dicho periodo un lesionado con serios traumatismos tiene el porcentaje más alto de sobrevivencia, además de disminuir las complicaciones y secuelas. El otro concepto de importancia son los denominados “10 minutos de platino”, el cuál es el intervalo de tiempo en que una persona con lesiones graves y con compromiso vital debería permanecer en el lugar en donde ocurrió el siniestro como máximo antes de recibir la atención de primer contacto por parte de los servicios de AMP, el recibir atención médica en los primeros 10 minutos después del accidente representa para el 85% de los casos de lesiones una mayor oportunidad de permanecer con vida.

Los problemas de localización (Colebrook, Localización de servicios en redes, 2003) consisten en encontrar la ubicación más adecuada dónde establecer uno o más servicios, de forma que se optimice (minimice o maximice) algún o algunos criterios específicos. Dada la localización, estos criterios están usualmente relacionados con la distancia (considerada como medida de costo) existente entre los servicios y los puntos de demanda (clientes).



Diversas investigaciones (Budiharto, 2012) (G.Y. Handler y Mirchandani P.B., 1979) han demostrado, que una forma de reducir la mortalidad a causa de cualquier tipo de accidentes se puede obtener con la optimación en el emplazamiento de los servicios de emergencia (ambulancias, estaciones de policía y/o bomberos), dicha ubicación tiene la finalidad de que la respuesta a las solicitudes de atención sean atendidas en el menor tiempo posible.

### 1.3 Delimitación de la zona de estudio.

A través de las reuniones ordinarias de los Consejos Estatales para la Prevención de Accidentes (COEPRA) se conformaron los Observatorios Estatales de Lesiones (OEL), mediante la firma de un acta de creación en la que los representantes de instituciones gubernamentales acuerdan las funciones y establecen mecanismos de intercambio de información.

Durante el año 2015 se instalaron 26 OEL, para ese entonces quedó pendiente la instalación de los OEL en los Estados de: Colima, Chiapas, Nayarit, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán.

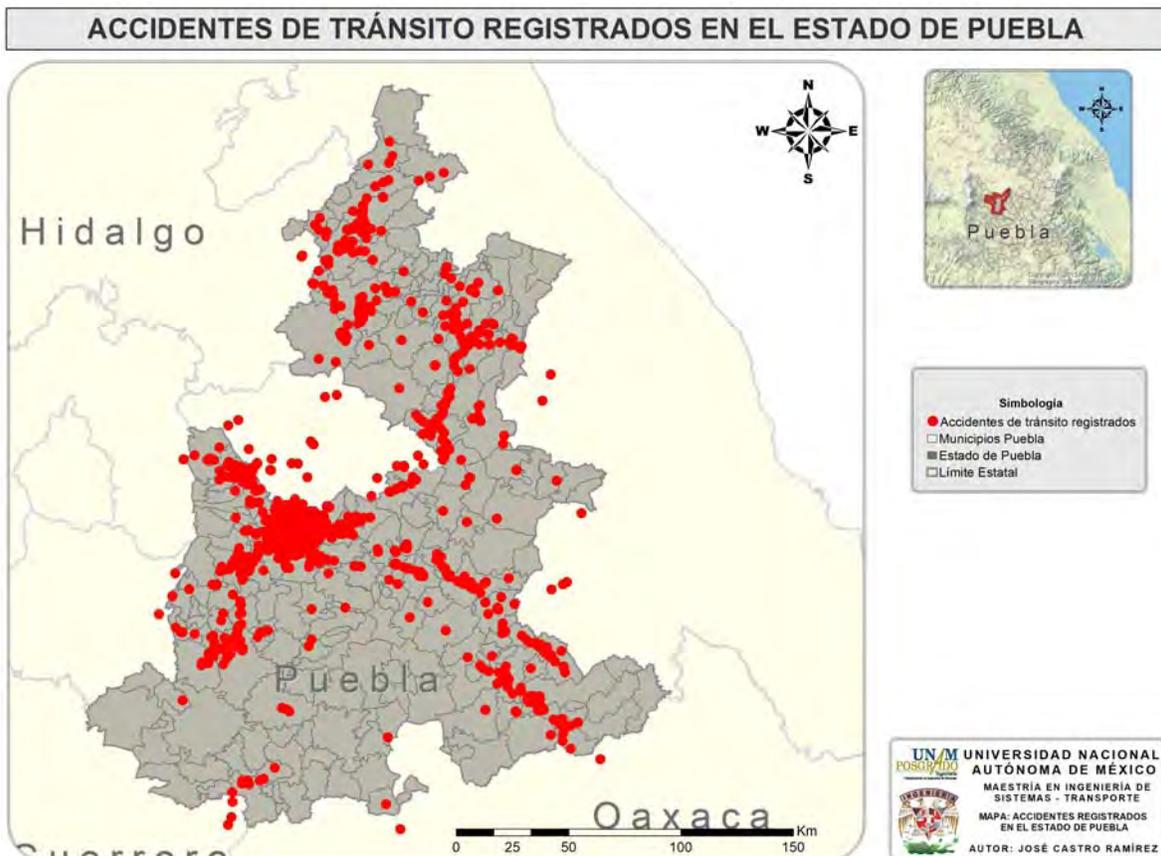
El Observatorio Nacional de Lesiones (ONL) puso en marcha una plataforma informática móvil y web denominada Registro de Accidentes Viales en México (RAVMex), en la cual los OEL se encargan de alimentar la base de datos del sistema con la ubicación espacial (georreferenciación) de los accidentes de tránsito y las características de éste.

Las entidades que presentaron la tasa de mortalidad con mayor número de defunciones en el año 2014 son las mostradas en la Tabla 2:

Estado	Total de siniestros anuales registrados	Peatón	Ciclista	Motociclista	Ocupante
Jalisco	49,151	5.2	0.1	1.3	2
Guanajuato	16,332	5.6	0.4	1.1	2.8
Puebla	12,264	4.5	0.3	0.8	2.1
México	10,576	4.5	0.1	0.4	1.7
Veracruz de I. de la Llave	9,298	1.6	0	1.3	2.9

*Tabla 2 Tasa de mortalidad de las cinco entidades con mayor número de defunciones  
Fuente: (CONAPRA, 2015)*

Con base a los datos mostrados en la tabla anterior, se solicitó información a la Secretaría de Salud referente al sistema de RAVMex acerca de los siniestros de tránsito ocurridos en los cinco Estados mencionados, a lo cual la Secretaría solo proporcionó datos de accidentalidad del Estado de Puebla. Por tal motivo, el Estado de Puebla fue seleccionado para desarrollar el presente caso de estudio; aunado a la información proporcionada por el RAVMex se consideró que el Estado durante el año 2014 se situó en las primeras 5 entidades con mayor tasa de mortalidad a causa de accidentes de tránsito. La base de datos que proporcionó el RAVMex consiste en un compendio de 6,651 accidentes de tránsito cargados al sistema RAVMex en el periodo del 16 de Julio de 2015 al 8 de Julio de 2016. La distribución espacial de los siniestros de tránsito en el Estado se muestra en el Mapa 1.



Mapa 1 Accidentes de tránsito en el Estado de Puebla registrados en el RAVMex  
Fuente: Elaboración propia con datos del RAVMex

Por otra parte, el INEGI cuenta con una base de datos de accidentes de tránsito,



dicha información no empata con el total de registros exhibidos por el CONAPRA en sus reportes anuales, sin embargo, los datos del INEGI se incluyen en el análisis de la zona de estudio; dado que CONAPRA no exhibe estadísticas municipales del Estado de Puebla y dicha información servirá como filtro para delimitar la zona de estudio con mayor detalle.

Durante el año 2015 (Gráfica 4) el INEGI registró 10,202 siniestros viales, de los cuales 190 de ellos causaron la muerte a alguna de las personas involucradas en los mismos. El promedio de accidentes registrados en la entidad durante en el periodo del año 2008-2015 es de 11,459 siniestros viales por año.



*Gráfica 4 Registro histórico de accidentes de tránsito en el Estado de Puebla  
Fuente: Base de datos de accidentes de tránsito de INEGI*

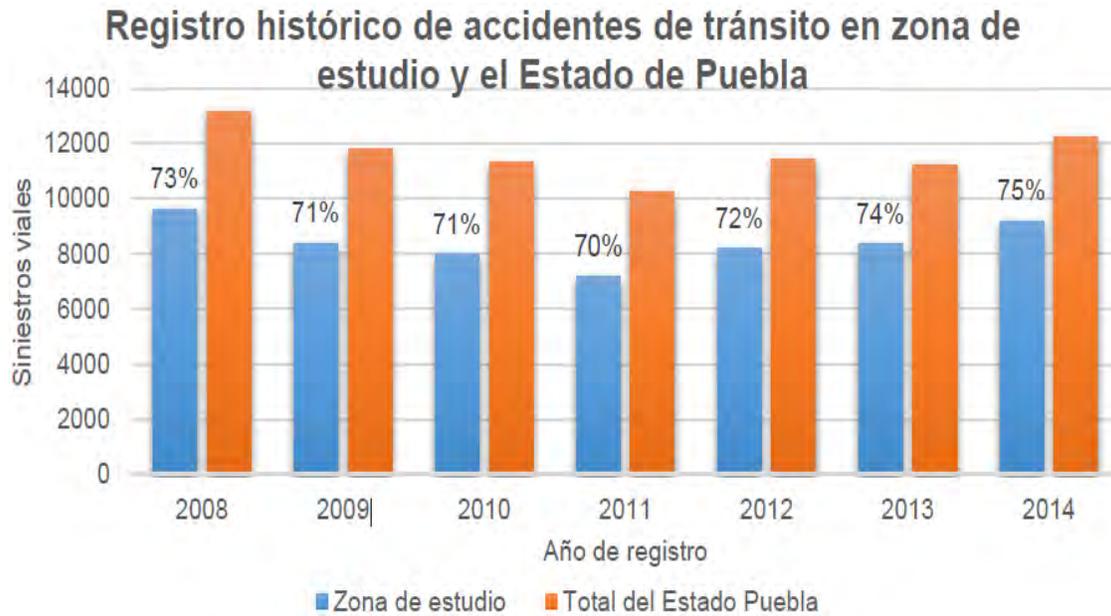
El Mapa 2 muestra la ubicación espacial de los municipios que integran la zona de estudio, además se observa que los municipios en conjunto forman una superficie continua entre ellos, lo que favorecerá al análisis de los datos espaciales.



Mapa 2 Ubicación de zona de estudio

Fuente: Elaboración propia

Al realizar un análisis detallado en los registros de siniestros viales contenidos en la base de datos del INEGI durante los años 2008 al 2014, se pudo detectar que poco más del 70% de los siniestros registrados anualmente se concentran en cuatro municipios: Puebla, San Andrés Cholula, San Pedro Cholula y Cuautlancingo, este indicador se considera como fundamental para la elección de la zona de estudio del presente trabajo de investigación, el detalle de los registros anuales, así como, el porcentaje de ocurrencia dentro de la zona de estudio se detallan en la Gráfica 5.



Gráfica 5 Registro histórico de accidentes de tránsito en zona de estudio y total registrado en el Estado de Puebla

Fuente: Base de datos de accidentes de tránsito de INEGI

Es de gran importancia mencionar que la delimitación de la zona de estudio simplificará el análisis en cuestión de extensión territorial; con ello, el diseño de red de estudio y análisis de velocidades en la zona de estudio se llevará a cabo con mayor detalle y así se tendrá una mejor representación de las condiciones prevalecientes en la zona de estudio.



## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Estado del arte

El diseño de metodologías para la ubicación de sitios estratégicos para vehículos destinados a la AMP u hospitalaria es un tema en el que la literatura y artículos de investigación cuentan con una extensa gama de estudios realizados, en el campo de aplicación de la ingeniería se han utilizado diversos métodos matemáticos y de simulación para la obtención de lugares estratégicos para la ubicación de las ambulancias, dichas ubicaciones tienen el objetivo de representar el menor costo en función de tiempo, distancia y/o costos económicos o un conjunto de 2 o más variables, la finalidad de utilizar metodologías para la localización de instalaciones es; el llegar en el menor tiempo posible a los distintos lugares en los que se presente algún siniestro y brindar la atención médica oportuna; algunos países en los que se han aplicado dichas metodologías son: Estados Unidos, Indonesia, México y Noruega, entre muchos más países, a continuación se describen algunos de los casos estudiados en los países anteriormente mencionados.

#### 2.1.1 Caso Fayetteville (Carolina del Norte), Estados Unidos

En este caso de localización de Sistemas de Emergencias Médicas (SEM) (Asad Tavakoli, 2004), se utilizó un enfoque de modelado matemático para la localización/asignación de vehículos de emergencia e instalaciones, éste modelo se aplicó al SEM de la ciudad de Fayetteville, Carolina del Norte; el estudio fue financiado por Cape Fear Valley Medical Center.

La respuesta de los SEM dentro de Estados Unidos tiene un promedio de ocho minutos para la atención médica de la emergencia, durante el año de estudio (2004), sólo seis de las 13 ambulancias disponibles estaban en uso debido a un número insuficiente de personal. Las ambulancias generalmente fueron situadas en zonas de alta densidad para facilitar el objetivo de la máxima cobertura. No obstante, el tiempo medio de respuesta de los servicios de atención médica fue de 9.2 minutos. Por otra parte, en el año 2004 se tenían ocho instalaciones (hospitales) disponibles. El objetivo del estudio fue identificar la ubicación/distribución óptima de los 18



vehículos de emergencia para el sistema del Condado de Cumberland de los SEM, para la solución del problema analizado se desarrollaron dos modelos matemáticos:

- Modelo I. Optimización del sistema actual (reubicación de los vehículos): El objetivo de este modelo es maximizar la cobertura mediante la redistribución de las seis ambulancias disponibles entre las ocho instalaciones existentes. En este modelo se tuvo la restricción inicial de que las ambulancias solo se pueden ubicar donde existen actualmente las instalaciones. Con la limitación de los nodos predefinidos que se pueden alcanzar dentro de ocho minutos, se redujo la magnitud de la demanda cubierta; los resultados indicaron que poco más del 70 por ciento de todas las llamadas se pueden cubrir en un tiempo de 8 minutos. Cuando la restricción de ubicación de los vehículos se eliminó y el modelo se habilitó para localizar vehículos en cualquiera de las ocho instalaciones, la cobertura se aumentó a 76 por ciento una ganancia de aproximadamente cinco por ciento.
- Modelo II. Optimización del sistema con 30 sitios potenciales: En este modelo se buscó maximizar la cantidad de demanda de servicio dentro de la limitación de tiempo de ocho minutos y en la reubicación de las instalaciones y vehículos entre los 30 sitios recomendados por oficiales de SEM. Estos sitios se componen de ocho sitios existentes y 22 estaciones de bomberos dispersos por todo el condado. Las soluciones óptimas en función del número de instalaciones (desde seis a 30 instalaciones) y número de vehículos (de seis a 13 ambulancias) revelaron que bajo el escenario del modelo anterior (mismo número de instalaciones y ambulancias) se obtiene una ganancia de casi dos puntos porcentuales más que el alcanzado con el Modelo I (75.982%-77.918%). La principal diferencia con el Modelo I es que el Modelo II puede seleccionar 30 sitios de despacho en lugar de ocho sitios.

Los resultados obtenidos en este estudio ponen en evidencia que mediante el uso de modelos matemáticos se puede mejorar el tiempo de respuesta para los servicios de emergencias médicas, aún en el caso de que el número de instalaciones a



reubicar se encuentre limitado a un número predefinido; se puede obtener un beneficio en el porcentaje de cobertura de la población con la utilización de dichos métodos. Es importante mencionar que el objetivo de la aplicación de los modelos matemáticos fue encaminado a mejorar el porcentaje de cobertura dentro de los ocho minutos que son considerados como tiempo promedio de respuesta para los servicios de emergencias en el país que se realizó el estudio.

### 2.1.2 Caso Surakarta, Indonesia

En la ciudad de Surakarta (Budiharto, 2012), se realizó un estudio para la identificación de puntos negros (lugares en los que se tiene alta incidencia de accidentes de tráfico) y de movilización de rutas rápidas para ambulancias; este estudio exhibe que los accidentes de tráfico que se producen dentro de la ciudad tienen tendencias a incrementar año con año; Budiharto establece que la atención de las víctimas de accidentes de tráfico se divide en dos fases, la fase prehospitalaria y la fase hospitalaria. En la fase prehospitalaria se brinda la atención a los pacientes antes de su llegada al hospital y posteriormente se realiza la movilización de lugar de un accidente de tráfico a un hospital. El estudio reconoce la importancia del tiempo de viaje en el proceso de movilización de los pacientes, esto debido a que el tiempo de atención es proporcional a la posibilidad de que los accidentados puedan morir, por ello, era necesario encontrar una ruta que sea más rápida y minimice el tiempo de viaje, el objetivo del estudio es poder determinar las 21 ubicaciones de los accidentes (puntos negros) utilizando como apoyo un Sistema de Información Geográfica (SIG) para realizar una representación gráfica y espacial de la demanda de servicios dentro de la ciudad de estudio, para posteriormente determinar un hospital de referencia para que las personas accidentadas sean trasladadas y finalmente localizar la ruta más rápida para seguir en el proceso de movilización de los pacientes en el menor tiempo posible.

En el estudio mencionado se realizó una función dependiente de la variable “tiempo”, la cual se considera como; normal, hora pico y hora valle; los resultados de la ruta más corta igualmente se dividen en tres categorías, en función de la



distancia, ruta más rápida (tiempo) y vía eficaz (distancia, tiempo y costo). Para esta investigación se utilizó como base un Sistema de Información Geográfica (SIG), los factores utilizados fueron: tipo de regulación en la intersección (si cuenta con semáforo la intersección), el volumen de tráfico y la velocidad permitida en la vía. En el análisis se utilizó el programa ArcGIS, mediante el cual se determinó un área de influencia para los siete hospitales de Salud que se encuentran dentro de la ciudad de estudio. El área de influencia se consideró de cinco minutos de viaje según la caracterización de la red para llegar a la ubicación del siniestro.

El resultado de la investigación fue la obtención de 15 puntos negros de accidentes de tráfico y el tiempo medio necesario para movilizar a las víctimas de accidentes de tráfico hacia alguna institución de salud fue de 4.84 minutos, además se concluye que una forma de reducir el riesgo de muerte a causa de un accidente de tráfico es encontrar rutas para ambulancias que representen el menor costo (en función de tiempo, distancia y costo de viaje).

### 2.1.3 Caso Tijuana, México

En la ciudad de Tijuana (Dibene, Maldonado, Vera, & Oliveira, Optimizing the location of ambulances in Tijuana, Mexico, 2017)), se realizó un informe de la demanda de Servicios Médicos de Emergencia (SME) en Tijuana, Baja California, dicho informe fue considerado como base para realizar un proceso de optimización de ubicación de las ambulancias de la Cruz Roja de Tijuana (CRT); proveedor de servicios SEM en la región. Los datos proporcionados por la CRT para el proceso de optimización de ubicación se utilizaron más de 10,000 llamadas de emergencia recibidas durante el año 2013, con la finalidad establecer el comportamiento de la demanda de SME en diferentes escenarios; se consideraron factores como: la hora de solicitud de servicio y tipo de día (hábil o de asueto).

Para el caso de estudio, se propuso y resolvió una modificación del Modelo Doble Estándar (DSM) para determinar una solución al problema de ubicación de ambulancias que satisfaga simultáneamente las restricciones especificadas en



todos los escenarios de demanda seleccionando desde un conjunto de casi 1,000 ubicaciones factibles.

En los escenarios analizados durante el estudio, se pudo constatar que la distribución espacial actual de las ocho ambulancias administradas por la CRT no contaba con la capacidad suficiente para atender la demanda de servicios; se determinó que el tiempo promedio de atención a algún servicio sería de 23 minutos en promedio para satisfacer la demanda bajo las condiciones prevalecientes del estudio.

Para dicho caso de estudio se consideró el número de veces que cada punto de demanda está cubierto dentro de los radios de cobertura de 14 minutos ( $r_2$ ) y de 10 minutos ( $r_1$ ), respectivamente. Los resultados mostrados en la Tabla 3 se exhibe el porcentaje de demanda cubierto dentro del primer radio para los ocho escenarios considerados, la tercera y la cuarta columna muestran la demanda total y el porcentaje de demanda cubierta al menos dos veces dentro del mismo radio considerando solo 11 instalaciones factibles, mientras que para el escenario propuesto se consideraron 969 instalaciones factibles; la cobertura obtenida se muestra en las columnas sexta y séptima respectivamente.

Escenario	Demanda	Escenario base (11 instalaciones)			Escenario propuesto (969 instalaciones)		
		Cobertura doble		Simple	Cobertura doble		Simple
#		Doble	%	%	Doble	%	%
1	675	500	74.1	96.1	506	75	95.1
2	1417	1072	75.7	96	1111	78.4	95.1
3	1680	1303	77.6	96	1303	77.6	95
4	1503	1156	76.9	96.3	1189	79.1	95.1
5	424	331	78.1	97.2	351	82.8	95
6	624	478	76.6	95.2	481	77.1	95.2
7	694	509	73.3	95.1	523	75.4	95.1
8	729	564	77.4	96.6	577	79.1	95.6
1-8	7746	5913	76.3	95.1	6041	78	95

*Tabla 3 Cobertura de servicios con modelo de doble cobertura utilizado*

*Fuente: (Dibene, Maldonado, Vera, & Oliveira, Optimizing the location of ambulances in Tijuana, Mexico, 2017)*



#### 2.1.4 Caso Sor Trondelag, Noruega

El área del caso de estudio corresponde al condado de Sør-Trøndelag en Noruega, el cual se caracteriza por una población dispersa; con dos tercios de la población viviendo en áreas urbanas y un tercio en áreas rurales. La carga de trabajo para las ambulancias es significativamente mayor en las áreas urbanas, mientras que el tiempo de servicio es mayor en las áreas rurales.

Para el caso de estudio se contó con 16 estaciones de ambulancia y 24 ambulancias; para atender la región caracterizada previamente en 139 zonas de demanda y 76 ubicaciones de instalaciones potenciales. El objetivo del análisis fue brindar a la población el mejor SME posible de acuerdo a un conjunto de medidas de rendimiento seleccionadas, las cuales son:

- Probabilidad de supervivencia de paro cardíaco.
- Medida de cobertura basado en el tiempo de respuesta.

Asimismo, se consideraron diferentes restricciones, como son:

- Despliegue; asociadas con el número de estaciones y ambulancias disponibles.
- Cobertura; de demanda para las diferentes zonas.
- Tasa de llegada; cantidad de llamadas para solicitudes de servicio.
- Tasa de servicio; controlan el tiempo de servicio de las llamadas en cada estación.
- Disponibilidad: combinan la tasa de llegada y tasa de servicio para calcular la probabilidad de tener una ambulancia disponible en una estación.

Para este trabajo se utilizó un modelo de localización denominado Problema de Localización de Rendimiento Máximo Esperado para Regiones Heterogéneas (MEPLP-HR), el cual considera como base el modelo MEXCLP (Maximum Expected Covering Location Problem).

Al ejecutar el algoritmo se obtuvo que, en comparación con la asignación actual de las ambulancias, el valor objetivo es 8.2% superior. Además, se analizaron diferentes escenarios en lo que se incluyeron hasta cinco ambulancias de respaldo



para una misma zona, y se obtuvo que el comportamiento de la demanda cubierta para más de dos ambulancias en una misma zona no representa un porcentaje significativo en su incremento de cobertura.

## 2.2 Modelos de localización de instalaciones

La aplicación de modelos de localización de instalaciones ha tenido protagonismo principalmente en el sector privado; para el establecimiento de nuevos negocios. En el sector público también se han utilizado para la localización de servicios de emergencia (ambulancias, estaciones de policía y bomberos), en el caso de los servicios de ambulancias (Daskin, 2013) señala que un mal emplazamiento de las ambulancias provocará un incremento en el tiempo promedio de respuesta, con el incremento asociado a la probabilidad de fallecimiento de la persona a la que se le brindará el servicio.

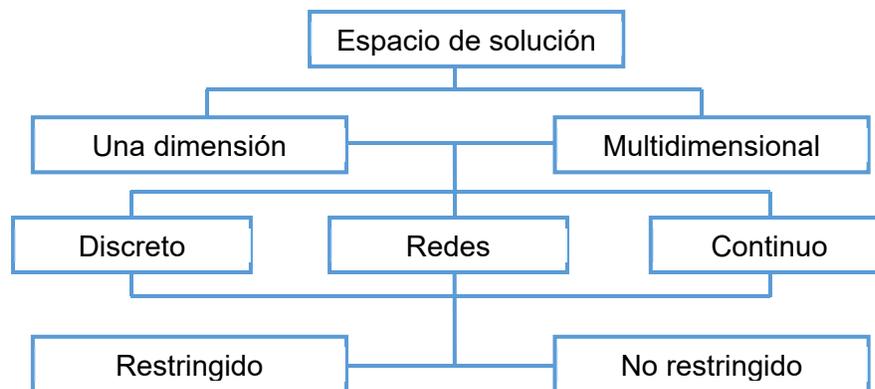
Los problemas de localización (Colebrook, Localización de servicios en redes, 2003) consisten en encontrar la ubicación más adecuada dónde establecer uno o más servicios, de forma que se optimice (minimice o maximice) algún o algunos criterios específicos. Dada la localización, estos criterios están usualmente relacionados con la distancia (considerada como medida de costo) existente entre los servicios y los puntos de demanda (clientes).

El inconveniente principal para la aplicación de los algoritmos que emanan de la teoría de localización (Sendra, 2004) es la baja disponibilidad de los numerosos datos que son necesarios analizar para llevar a cabo los cálculos numéricos que la mayoría de los algoritmos relacionados con dicha teoría requieren; esta situación ha comenzado a mejorar debido al desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los SIG son herramientas informáticas especialmente adecuadas al estudio de problemas de localización, ya que se pueden realizar diversos análisis con gran agilidad y facilitan la realización de cálculos matemáticos necesarios para los algoritmos de la teoría de localización.

Existen diversas clasificaciones de los modelos de localización, esta clasificación depende de diversos autores, por ejemplo (Colebrook, Localización de servicios en redes, 2003) y (Aceves, 2007) proponen tres áreas de investigación:



- Localización continua: se permite que las localizaciones estén en cualquier lugar dentro de un espacio “d” dimensional.
- Localización discreta: se especifican a priori un número finito de posibles localizaciones en el espacio. A veces también se denomina localización-asignación.
- Localización en redes: tipo especial de problemas de localización que se plantean sobre redes, entendiendo como red a un conjunto de puntos o vértices unidos por un conjunto de aristas que representan conexiones entre esos puntos.



Esquema 1 Clasificación de los problemas de localización propuesta por (Aceves, 2007)  
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de (Aceves, 2007).

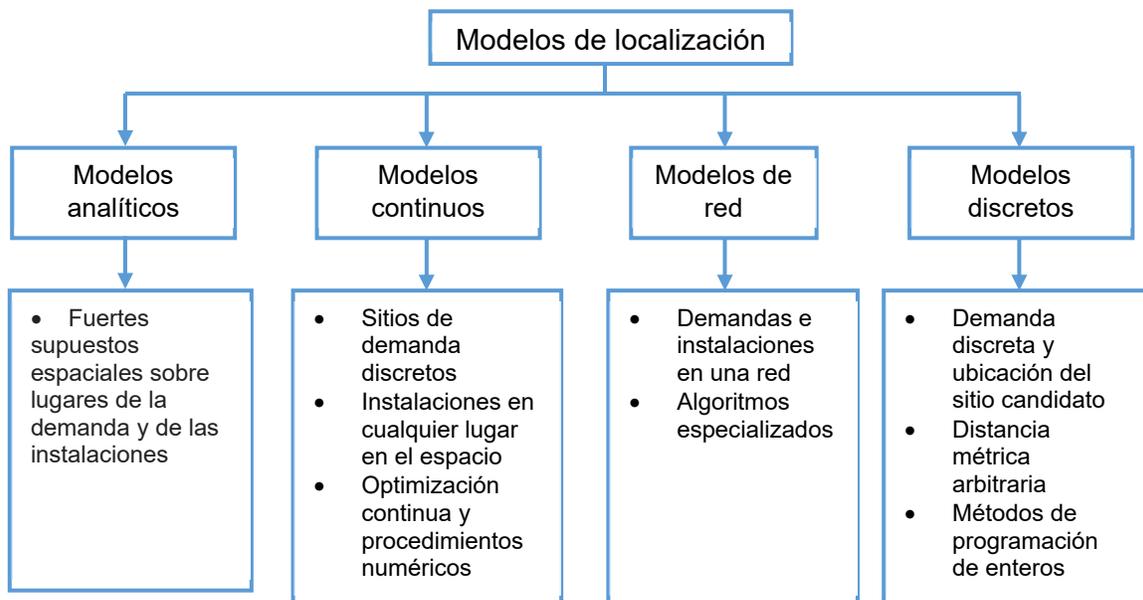
Por otra parte (Daskin, 2013) propone una clasificación más compleja de los métodos de localización que es la siguiente:

- Los modelos de localización analíticos; asumen que las demandas se distribuyen de alguna manera en el espacio, los lugares candidatos para las instalaciones también son supuestos.
- Los modelos de localización continuos; suponen que las demandas se producen en sitios discretos. El nivel de la demanda en estos sitios se conoce a priori. Las instalaciones candidatas pueden ubicarse en cualquier lugar de una región. El modelo de localización Weber es típico de los modelos de esta clase. El modelo de Weber encuentra el centro de gravedad de los puntos de demanda.
- Los modelos de ubicación de red; tratan demandas que se encuentran en una red compuesta de nodos y vértices. Típicamente, las demandas se



encuentran en los nodos de la red. Las instalaciones pueden estar situadas en los nodos o en los vértices de la red que cumplen con las facilidades necesarias a modo de que la demanda de un grupo de clientes sea satisfecha (el término facilidad, se refiere en su más amplio sentido, ya que puede incluir entidades como hospitales, industrias, colegios, puertos, etc.). La investigación en este campo es a menudo dirigida a la búsqueda de algoritmos eficientes para resolver casos especiales de problemas de ubicación de red.

- Los modelos de localización discretos hacen supuestos particulares sobre los lugares de la demanda y de las instalaciones. Simplemente como resultados arrojan las ubicaciones o coordenadas de los nodos de la demanda y los lugares candidatos. Las "distancias" entre los lugares de demanda y candidatos no tienen que preferir una fórmula particular. Estos modelos se formulan a menudo como modelos de programación entera y resuelven usando métodos exactos o métodos heurísticos (aproximados).



Esquema 2 Clasificación de los problemas de localización propuesta por (Daskin, 2013)  
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de (Daskin, 2013).

Los métodos para el análisis de localización de instalaciones (Krajewski, Ritzman, & Malhotra, 2008) son complejos, el problema consiste en determinar el número, tamaño, patrón de asignación y localización de las instalaciones. Es factible que



haya miles de centros de demanda, cientos de posibles localizaciones para los almacenes, varias plantas (o ubicaciones de servicio) y múltiples líneas de productos. Frente a tal grado de complejidad es necesario usar una metodología de cálculo para realizar una evaluación completa. Para este propósito se han desarrollado tres tipos básicos de modelos de cálculos:

1. Heurísticos: Las reglas empíricas, así como los lineamientos de solución, permiten encontrar soluciones factibles (aunque no necesariamente óptimas) para los problemas de localización de instalaciones. Entre las ventajas que ofrecen los métodos heurísticos figuran la eficiencia y la capacidad de manejar los aspectos generales de un problema. El procedimiento de búsqueda sistemática se realiza utilizando como base el algoritmo del centro de gravedad de un área objetivo.
2. De simulación: La simulación es una técnica de modelado que reproduce el comportamiento de un sistema. La simulación permite manipular las variables implicadas en un caso de estudio, mediante la modelación se puede saber los efectos de esas manipulaciones sobre medidas de operación seleccionadas. Los modelos de simulación permiten al analista evaluar diferentes alternativas de localización por medio de prueba y error. Para cada intento, el analista indica qué instalaciones se van a abrir y, por lo general, el simulador toma las decisiones sobre asignación.
3. De optimización. La optimización implica procedimientos para encontrar la mejor solución. Aun cuando este enfoque podría parecer preferible, tiene una limitación: los procedimientos de optimización utilizan generalmente visiones simplificadas y menos realistas de los problemas.

### 2.3 Modelos de cobertura para ubicación y planificación de instalaciones de emergencia

Los modelos de localización de servicios de emergencia dentro de la literatura pueden clasificarse en dos grandes grupos (Daskin MS, 1988;15): los que se ocupan de cubrir las demandas dentro de un estándar de tiempo de respuesta específico que se llaman de cobertura y los que tienen como objetivo minimizar el



tiempo de respuesta promedio del sistema que se llaman P-Mediana.

La localización de servicios de ambulancias (Daskin, 2013) mediante modelos matemáticos históricamente se ha realizado para cubrir diferentes objetivos, algunos de los cuales se enlistan a continuación:

- Minimizar el número de ambulancias necesarias para que todos los nodos de servicios estén dentro de un número dado de minutos (el estándar de servicio) de la ambulancia más cercana. El modelo matemático asociado a este objetivo se conoce como modelo de zona cubierta. Las demandas se dice que están cubiertas si la ambulancia más cercana se encuentra a no más de  $X$  minutos de distancia, donde  $X$  es el estándar de servicio utilizado en el modelo.
- Maximizar el número de servicios que pueden ser cubiertos dentro de un estándar de servicio especificado usando un número determinado de vehículos. Tal modelo se conoce como un modelo de cobertura máxima.
- Minimizar el tiempo de respuesta promedio (el tiempo entre un sitio de la demanda y la ambulancia más cercana) utilizando un número de vehículos ( $P$ ) dados. Este modelo se denomina el problema P-Mediana.

En la mayoría de los modelos de cobertura, se considera que la demanda de servicio es cubierta si al menos un vehículo de AMP puede atender la llamada de emergencia dentro de un estándar de tiempo predefinido. El estándar establecido en el PHTLS como ya se ha mencionado; considera que en las zonas urbanas el 95% de las solicitudes se deben alcanzar en 10 minutos y en las zonas rurales las llamadas deben ser cubiertas en 30 minutos o menos.

Los modelos de cobertura para instalaciones de emergencia han sido ampliamente utilizados y estudiados durante varias décadas. Las siguientes notaciones son utilizadas para los modelos de cobertura que se describirán:

- V Conjunto de puntos de demanda
- $i$  Índice de puntos de demanda
- W Conjunto de instalaciones potenciales



- J Índice de ubicaciones (instalaciones) potenciales
- $t_{ij}$  Distancia (costo) desde el punto de demanda  $i$  a la instalación en el sitio  $j$
- $r$  Umbral de distancia (costo) para que un punto de demanda sea considerado como cubierto
- $W_i$  Conjunto de sitios de la instalación que cubren el punto de demanda  $i$
- $d_i$  Frecuencia de servicios en el punto de demanda  $i$
- $p$  Número total de instalaciones disponibles
- $y_i$  Variable binaria, igual a 1 sí y sólo sí el punto de demanda  $i$  está cubierto al menos una vez
- $x_j$  Variable binaria, igual a 1 sí y sólo sí una instalación se encuentra en el sitio  $j$

### 2.3.1 Modelo de cobertura de conjuntos de instalaciones (LSCP)

El modelo de cobertura de conjuntos de instalaciones (Location Set Covering Problem) es uno de los primeros modelos de grafos propuestos para la localización de vehículos de emergencia. Este modelo de cobertura se formula de la siguiente manera:

$$\min \sum_{j \in W} x_j \quad (1)$$

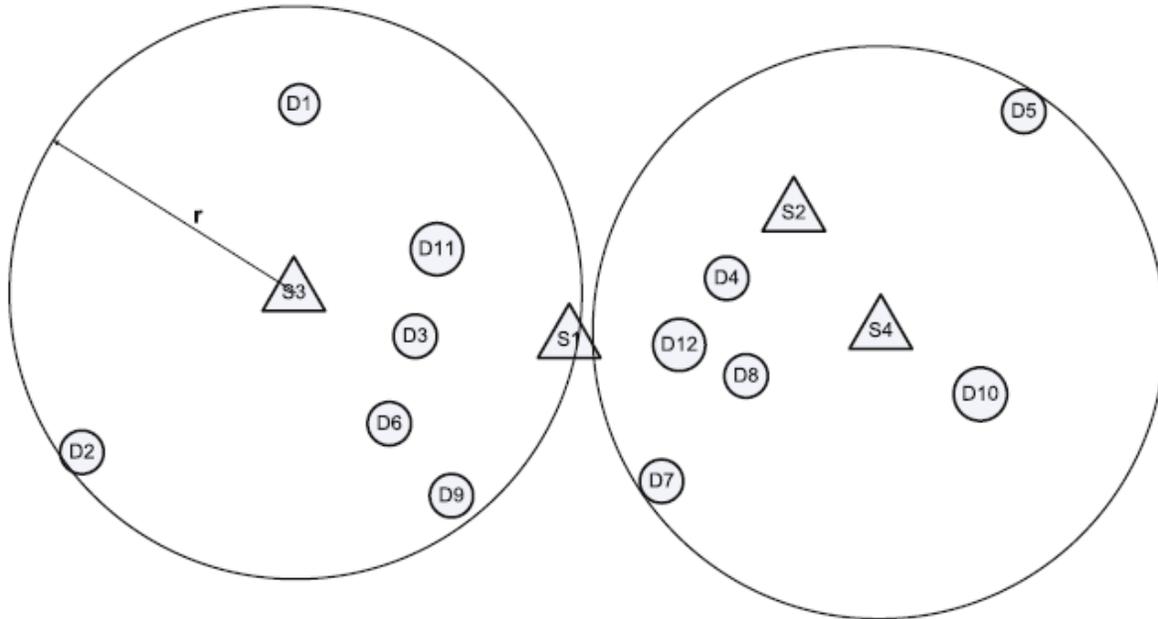
Sujeto a:

$$\sum_{j \in W} x_j \geq 1, \quad i \in V \quad (2)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad j \in W. \quad (3)$$

La función objetivo (1) minimiza el número total de instalaciones requeridas para cubrir todos los puntos de demanda, La restricción (2) especifica que todos los puntos de demanda deben ser cubiertos.

La Figura 1 ilustra este modelo con una solución factible. Hay cuatro sitios de instalaciones potenciales y doce puntos de demanda. Un punto de demanda está cubierto por una instalación siempre y cuando dicha instalación pueda alcanzar el punto de demanda dentro de la distancia estándar  $r$ . En esta ilustración, las instalaciones de localización en el sitio S3, S4 pueden cubrir todos los puntos de demanda, por lo que es una solución factible.



*Figura 1 Ilustración del LSCP. D1 a D12 son puntos de demanda mientras S1 a S4 son instalaciones de emergencia. Un punto de demanda está cubierto por una instalación si la distancia entre el punto de demanda y la instalación está dentro de  $r$ .*  
 Fuente: (Xueping, Zhao, Zhu, & Wyatt, 2011)

### 2.3.2 Problema de Localización con Cobertura Máxima (MCLP)

El problema de localización con cobertura máxima (Maximal Covering Location Problem) fue introducido por (Church RL, 1974), en este modelo se aborda el problema de maximizar la cobertura alcanzada para cada uno de los puntos de demanda, teniendo como parámetro del problema el número disponible de vehículos ( $p$ ) a asignar. Este modelo es definido a continuación:

$$\max \sum_{i \in V} d_i y_i \quad (4)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in W_i} x_j \geq y_i, \quad i \in V \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V} x_j = p \quad (6)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad j \in W. \quad (7)$$



La función objetivo (4) es maximizar la cobertura de la demanda. La restricción (5) garantiza la demanda que el punto  $i$  sólo está cubierto si una o más instalaciones se ubican dentro del estándar de distancia, y la restricción (6) especifica que el número total de instalaciones disponibles es igual a  $p$ . Este modelo considera el tamaño de la demanda y lo utiliza como el peso de cada punto de demanda en la función objetivo, lo que hace que el modelo sea más realista. El MCLP tiene como objetivo hacer el mejor uso posible de los recursos disponibles.

Existen diversas extensiones del MCLP. Por ejemplo (Dessouky, 2006) y (Jia, Ordonez, & Dessouky, 2007) estudiaron múltiples niveles de calidad y múltiples cantidades de las instalaciones en cada nivel de calidad para los puntos de demanda en sistemas de emergencias a gran escala. El modelo es formulado como:

$$\max \sum_k \sum_{i \in V} c^k d_i y_i^k \quad (8)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in W} x_j \leq p \quad (9)$$

$$\sum_{i \in W_i^k} x_j \geq Q_i^k y_i^k \quad i \in V, \quad k = 1, \dots, q \quad (10)$$

$$x_j, y_i^k \in \{0, 1\}, \quad j \in W, \quad i \in V, \quad k = 1, \dots, q \quad (11)$$

Donde  $c^k$  es el factor de ponderación de importancia de los puntos de demanda que tienen el nivel de calidad  $k$ ,  $y_i^k$  es una variable binaria, igual a 1 si y sólo si el punto de demanda  $i$  está cubierto en el nivel de calidad  $k$ .  $W_i^k$  representa el conjunto de los sitios de la instalación que pueden cubrir el punto de demanda  $i$  en el nivel de calidad  $k$  y  $Q_i^k$  denota el número mínimo de instalaciones que se deben asignar al punto de demanda  $i$  para lograr la cobertura del nivel de calidad  $k$ . Investigaciones desarrolladas por (Jia, Ordonez, & Dessouky, 2007) sugieren que el factor de ponderación y la probabilidad de ocurrencia de emergencia en cada punto de demanda deberían determinar el número de niveles de calidad y  $Q_i^k$ , debido a la complejidad de los incidentes de emergencia. La función objetivo (8) de este modelo



es maximizar las demandas cubiertas en diferentes niveles de calidad. La restricción (9) y (10) indican que el número total de instalaciones es menor que  $p$  y que  $y_i^k$  sea 0 si hay menos  $Q_i^k$  instalaciones que pueden cubrir el punto de demanda  $i$  con el nivel de calidad  $k$  respectivamente.

### 2.3.3 Modelo de Asignación de Equipos en Tándem (TEAM)

Uno de los inconvenientes de los modelos LSCM y MCLP reside en la restricción para manejar sólo una categoría de vehículos y de tipos de incidentes. En muchas ocasiones, dependiendo del tipo de incidente, es enviado un tipo diferente de vehículo. En otras ocasiones, dos tipos diferentes de vehículos son requeridos en el lugar del accidente, con tiempos estándar distintos para cada uno. El Tandem Equipment Allocation Model (TEAM) tiene como base el MCLP, con la diferencia de que existe un conjunto de variables adicionales para el segundo tipo de vehículos. Por lo tanto, un punto de demanda no se considera cubierto si no hay disponible un vehículo de cada tipo para atenderlo dentro del tiempo estándar asignado para cada categoría.

### 2.3.4 Modelo MCLP multiobjetivo (HOSC)

El modelo Hierarchical Objective Set Covering, este modelo es el primero que incorpora las ventajas de la programación jerárquica y multiobjetivo en el modelo básico MCLP, ya que propone:

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

De esta forma, se obtienen mejores resultados que con el modelo MCLP bajo condiciones de congestión. Esto se logra al maximizar el número de puntos cubiertos por más de un vehículo. Si en un estado de congestión, el vehículo idóneo para atender un incidente está ocupado, el segundo vehículo que cubre dicho punto podrá atender el incidente.



### 2.3.5 Modelos BACOP1 & BACOP2 multiobjetivo

El modelo Backup Coverage Problem (BACOP1 y BACOP2) es una combinación de los modelos LSCM y MCLP, en los cuales se agrega a la función objetivo inicial, una segunda función objetivo que busca maximizar el número de vehículos que estén dentro del tiempo máximo de atención de los puntos de demanda. Con esto, se apunta al objetivo de proteger al sistema de variaciones en la demanda al maximizar la cobertura de respaldo de los puntos de demanda. Dichos modelos tienen por objetivo maximizar la cobertura de la población con más de dos instalaciones y obligar a cubrir una sola vez todos los puntos de demanda.

### 2.3.6 Modelo doble estándar (DSM)

El modelo doble estándar (DSM), propuesto por (Gendreau, Laporte, & Semet, 1997), utiliza dos estándares de distancia  $r_1$  y  $r_2$ , ( $r_1 < r_2$ ).

$$\max \sum_{i \in V} d_i y_{i2} \quad (12)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in W_{i2}} x_j \geq 1, \quad i \in V \quad (13)$$

$$\sum_{i \in V} d_i y_{i1} \geq \alpha \sum_{i \in V} d_i \quad (14)$$

$$y_{i2} \geq y_{i1}, \quad i \in V \quad (15)$$

$$\sum_{j \in W_{i1}} x_j \geq y_{i2} + y_{i1}, \quad i \in V \quad (16)$$

$$\sum_{j \in W} x_j = p \quad (17)$$

$$x_j \leq p_j, \quad j \in W \quad (18)$$

$$y_{i2}, y_{i1} \in \{0, 1\}, \quad i \in V \quad (19)$$

$$x_j \text{ entero}, \quad j \in W \quad (20)$$



Donde  $y_{i1}$  y  $y_{i2}$  son variables binarias, igual a 1 si y sólo si el punto de demanda  $i$  está cubierto al menos una vez y dos veces dentro de  $r_1$ , respectivamente;  $w_{i1}$  y  $w_{i2}$  representan los conjuntos de instalaciones que pueden cubrir el punto de demanda  $i$  dentro de  $r_1$  y  $r_2$ , respectivamente. El objetivo del DSM es maximizar las demandas de servicios que están cubiertas por lo menos dos veces dentro de  $r_1$ . Las restricciones (13) y (14) expresan los requisitos de cobertura de que todas las demandas deben estar cubiertas dentro de  $r_2$  y una proporción  $\alpha$  de las demandas totales que deben cubrirse dentro de  $r_1$ . La restricción (15) impone que un punto de demanda no pueda ser cubierto dos veces si no está cubierto al menos una vez. Las restricciones (15) y (16) aseguran conjuntamente que el punto de demanda  $i$  se cubra dos veces solamente si hay dos o más instalaciones dentro de  $r_1$ . Las restricciones (17) y (18) limitan el número de instalaciones en cada instalación. DSM considera el tamaño de la demanda en cada punto de demanda y relaja la suposición de que sólo una instalación puede ser ubicada en cada sitio de la instalación.

La Figura 2 ilustra el DSM y una solución factible de este modelo, las posiciones de los puntos de demanda y de los sitios potenciales son las mismas que las de la Figura 1. Para maximizar las demandas cubiertas dos veces dentro de  $r_1$ , se coloca una instalación de emergencia adicional en el sitio  $S_1$ .

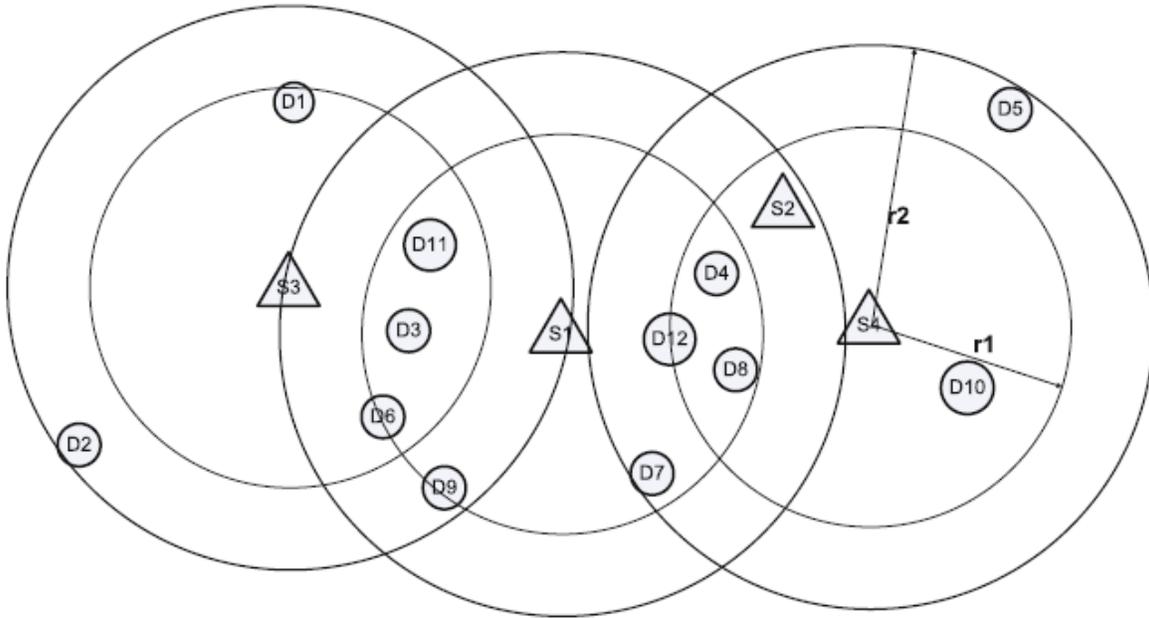


Figura 2 Ilustración del problema de ubicación de doble cobertura. Las posiciones de los puntos de demanda y de los sitios potenciales son las mismas que las de la Fig. 1. Para maximizar las demandas cubiertas dos veces dentro de  $r_1$

Fuente: (Xueping, Zhao, Zhu, & Wyatt, 2011)

### 2.3.7 Problema de localización de cobertura máxima esperada (MEXCLP)

El modelo MEXCLP (Maximal Expected Covering Location Problem) es una extensión del modelo HOSC en el cual se incluye el cálculo de la probabilidad de que un vehículo esté ocupado, utilizando un supuesto de independencia en la operación de los vehículos en el sistema. Su importancia radica en la inclusión del componente probabilístico en el modelo propuesto. El modelo puede ser formulado como sigue:

$$\max \sum_{ki \in V} \sum_{k=1}^p d_i (1 - q)^{k-1} y_{ik} \quad (21)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in W_i} x_j \geq \sum_{k=1}^p y_{ik}, \quad i \in V \quad (22)$$

$$\sum_{j \in W_i} x_j \leq p \quad (23)$$



$$y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i \in V, \quad k = 1, \dots, p \quad (24)$$

$$x_j \text{ entero}, \quad j \in W \quad (25)$$

Donde  $y_{ik}$  es una variable binaria, igual a 1 si y sólo si el punto de demanda  $i$  está cubierto por al menos  $k$  instalaciones. El objetivo de este modelo es maximizar la cobertura esperada dado un número limitado de instalaciones. El lado izquierdo de la restricción (22) representa el número total de instalaciones que cubren el punto de demanda  $i$  dentro de  $r$ , mientras que el lado derecho es el número de veces que el punto de demanda  $i$  está cubierto. Dado que el objetivo es maximizar, la restricción (22) y (23) serán satisfechas como igualdades. Al igual que con el DSM, el MEXCLP también permite más de una instalación en un sitio. El MEXCLP tiene dos suposiciones fuertes: instalaciones independientes y las mismas probabilidades de que una ambulancia este siendo utilizada en otro sitio. Sin embargo, en realidad, las demandas no están uniformemente distribuidas temporalmente y espacialmente, y por lo tanto la probabilidad de que un vehículo se encuentre ocupado varía de una instalación a otra.



## 2.4 Estrategia de solución

La estrategia empleada para la solución del caso de estudio se detalla en el siguiente diagrama de flujo.

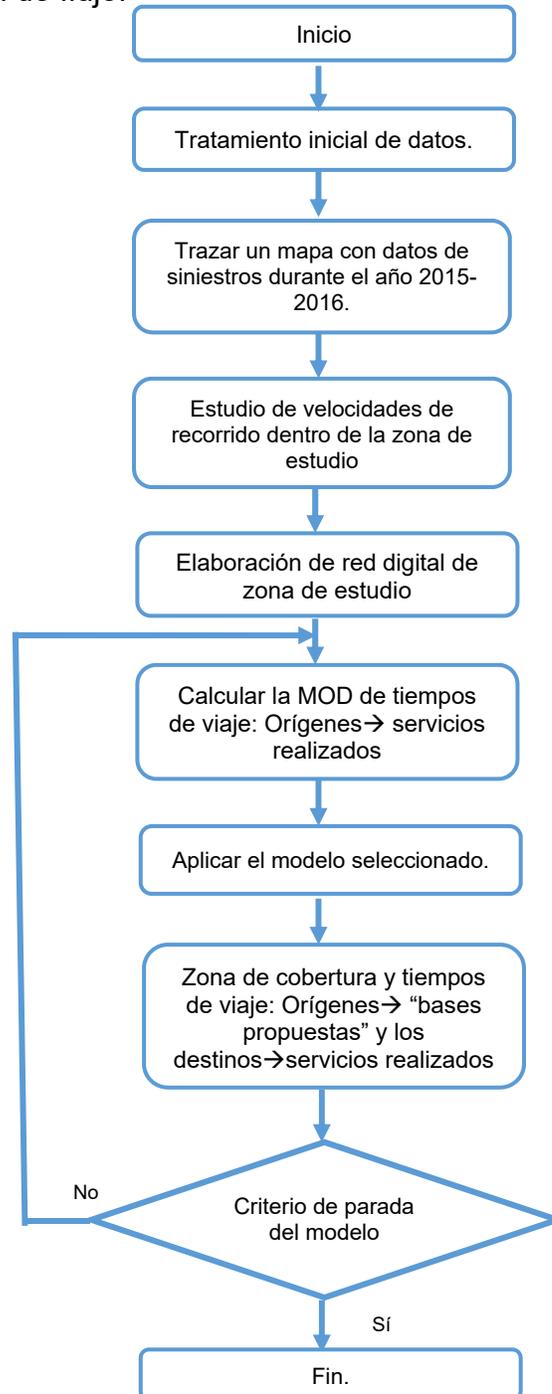


Diagrama 1 Estrategia de solución para el caso de estudio  
Fuente: Elaboración propia



## CAPÍTULO III. CASO DE ESTUDIO

### 3.1 Atención Médica Prehospitalaria en el Estado de Puebla

La AMP (Diario Oficial de la Federación, Norma Oficial Mexicana NOM-034-SSA3-2013, Regulación de los servicios de salud. Atención médica prehospitalaria., 2014) es definida como: “a la otorgada al paciente cuya condición clínica se considera que pone en peligro la vida, un órgano o su función, con el fin de lograr la limitación del daño y su estabilización orgánico-funcional, desde los primeros auxilios hasta la llegada y entrega a un establecimiento para la atención médica con servicio de urgencias, así como durante el traslado entre diferentes establecimientos a bordo de una ambulancia”.

La Norma Oficial Mexicana 034 de la Secretaría de Salud (NOM-034-SSA3-2013) contiene los elementos regulatorios mínimos necesarios que se deben cumplir en la AMP, esta norma es de observancia obligatoria para todos los prestadores de servicios de AMP de los sectores público, social y privado, que a través de ambulancias brinden servicios de traslado de pacientes ambulatorios, para la atención de urgencias y para el traslado de pacientes en estado crítico. Además de las características principales del equipamiento e insumos de las unidades móviles tipo ambulancia, así como la formación académica que debe tener el personal que presta el servicio en estas, esto con la finalidad de que se lleve a cabo con niveles homogéneos de calidad y seguridad en beneficio de la población en general.

En el Estado de Puebla algunas instituciones que se encargan de brindar la AMP (estabilización y traslado de cualquier persona siniestrada sin importar que dicha persona cuente con un servicio de salud de la iniciativa gubernamental o privada) son las siguientes:

- El Sistema de Urgencias Médicas Avanzadas (SUMA), perteneciente a la Secretaría de Salud del Estado Puebla (SSEP).
- La Cruz Roja Mexicana Puebla (CRMP).
- Servicio particular de ambulancias (instituciones de salud pertenecientes a la iniciativa privada ONG's).



SUMA, es una red de servicios médicos de emergencia, para apoyar a la población del Estado en caso de presentar alguna lesión o enfermedad en forma repentina, para ello SUMA cuenta con ambulancias al interior del Estado, las funciones principales del sistema de urgencias son:

- Brindar cobertura de emergencias médicas al interior del Estado, por ello el SUMA no realiza traslados programados ni proporciona consulta a domicilio.
- Otorgar la atención de emergencias prehospitalarias cotidianas, de tipo médico, traumático, obstétricas, traslados de pacientes graves vía terrestre a bordo de ambulancias certificadas.
- Apoyo a contingencias, emergencias mayores y desastres naturales.

El SUMA cuenta con diversos tipos de vehículos tipo ambulancia, éstas cuentan con una certificación internacional (Lloyd's Register) y están certificadas por la NOM-237-SSA1-2004, la clasificación de sus vehículos tipo ambulancia se muestra a continuación:

- Ambulancias avanzadas, personal a bordo; 1 operador TUM básico y un TUM avanzado.
- Ambulancias Básicas, personal a bordo; con 2 TUM's, uno básico y otro avanzado.
- Ambulancias de traslados, personal a bordo; un TUM.
- Ambulancias de Terapia Intensiva, personal a bordo; TUM básico, TUM intermedio y Médico.
- Bicicletas de primer contacto, personal a bordo; TUM básico.
- Ambulancias aéreas, con una certificación en Certified Flight Paramedic, Certified Critical Care Paramedic, avalado por Board for Critical Care Transport Paramedic Certification. Aviation Physiology Global Survival and Crew Resource Management avalado por Federal Aviation Administration.



*Figura 3 Ambulancias terrestres y aéreas de SUMA*  
*Fuente: (SSEP, 2017)*

Como ya se mencionó en el apartado nombrado: “Justificación del trabajo de investigación” contenido en el primer capítulo de la presente investigación, el tiempo de llegada a los sitios donde se requiera la AMP es de vital importancia; ya que el tiempo en el que se brinde la atención de primer contacto a los lesionados es proporcional a los daños permanentes que pueden sufrir los lesionados. SUMA por medio de la SSEP reporta que durante el año 2013-2015 (Tabla 4) sus vehículos prestan la atención a las solicitudes de atención dentro de los 10 minutos de platino, sin embargo, durante el año 2016 el tiempo de respuesta para los servicios de AMP se lleva a cabo después de los 10 minutos de platino; ello implica para los usuarios que solicitan dichos servicios un incremento en la probabilidad de que los daños sufridos por cualquier clase de siniestro o enfermedad puedan ocasionar daños irreversibles en su organismo, así mismo se incrementa la probabilidad de morir en el lugar del siniestro en espera de atención médica de primer contacto.

<b>Año</b>	<b>Tiempo promedio anual de llegada</b>
<b>2013</b>	7 minutos 47 segundos
<b>2014</b>	7 minutos 34 segundos
<b>2015</b>	7 minutos 48 segundos
<b>2016</b>	11 minutos 56 segundos

*Tabla 4 Tiempo promedio anual de llegada a los sitios donde se realiza la solicitud de atención*  
*Fuente: (Secretaría de Salud del Estado de Puebla, 2017)*



La logística que sigue el SUMA para brindar el servicio prehospitalario se detallada en el Diagrama 2:

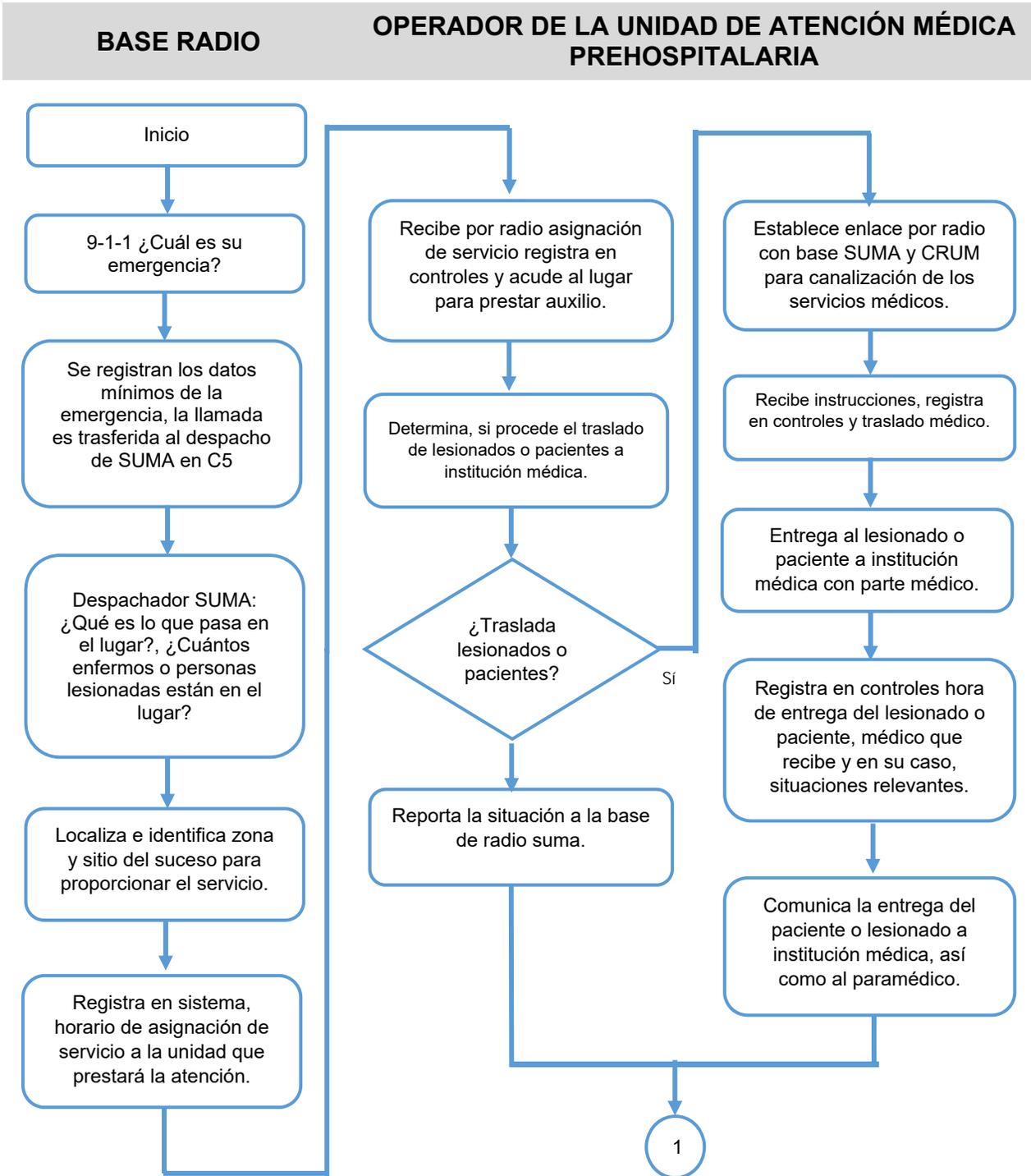


Diagrama 2 Protocolo de atención para unidades vehiculares de SUMA  
Fuente: (Secretaría de Salud del Estado de Puebla, 2017)

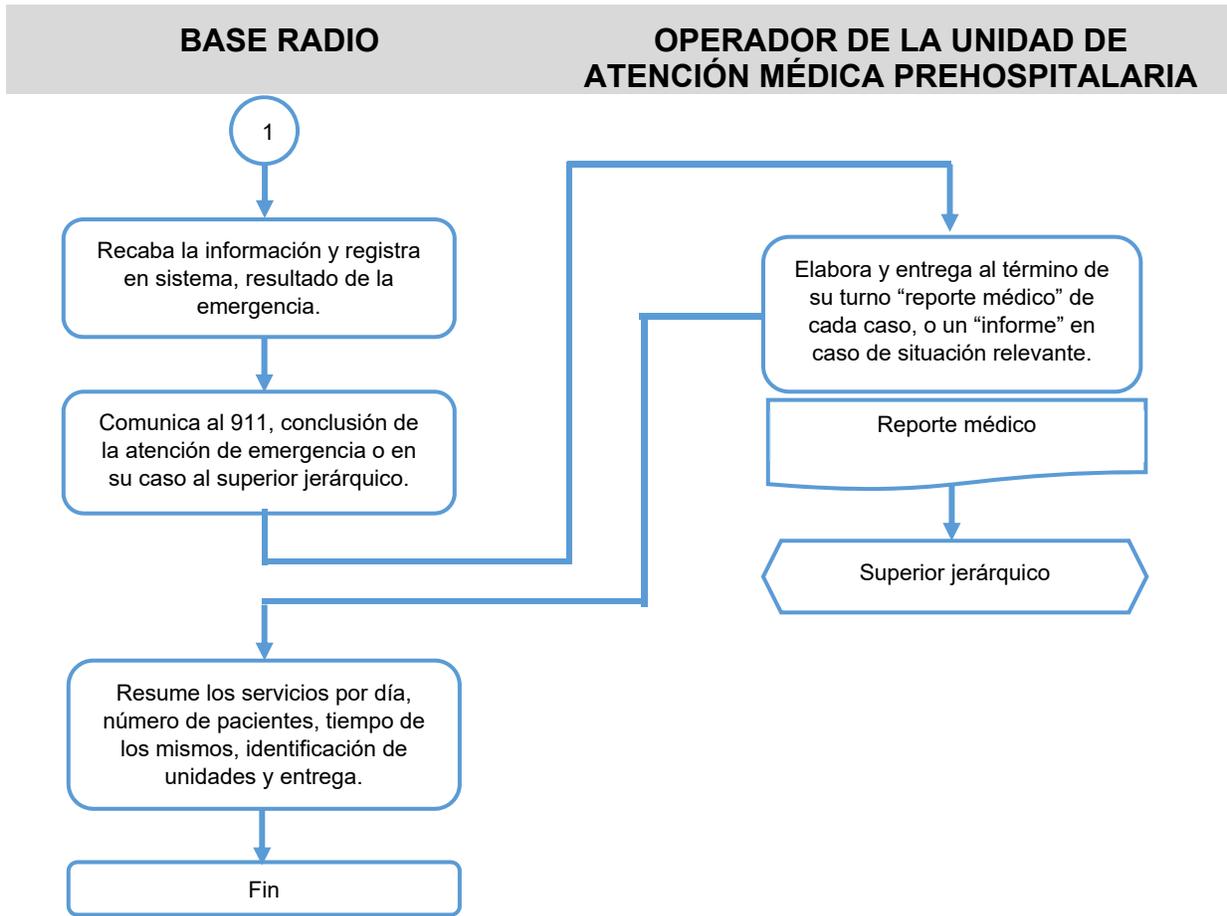


Diagrama 2. Continuación

Fuente: (Secretaría de Salud del Estado de Puebla, 2017)

### 3.2 Situación prevalecte de accidentes de tránsito en la zona de estudio

Algunas dependencias gubernamentales nacionales, tales como: Secretaría de Comunicaciones y Transporte, Instituto Mexicano del Transporte, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y Secretaría de Salud; se han encargado del análisis de accidentes de tránsito a nivel nacional. La literatura elaborada por dichas dependencias propone una clasificación de los accidentes vehiculares, las cuales tienen en común los conceptos mostrados a continuación.



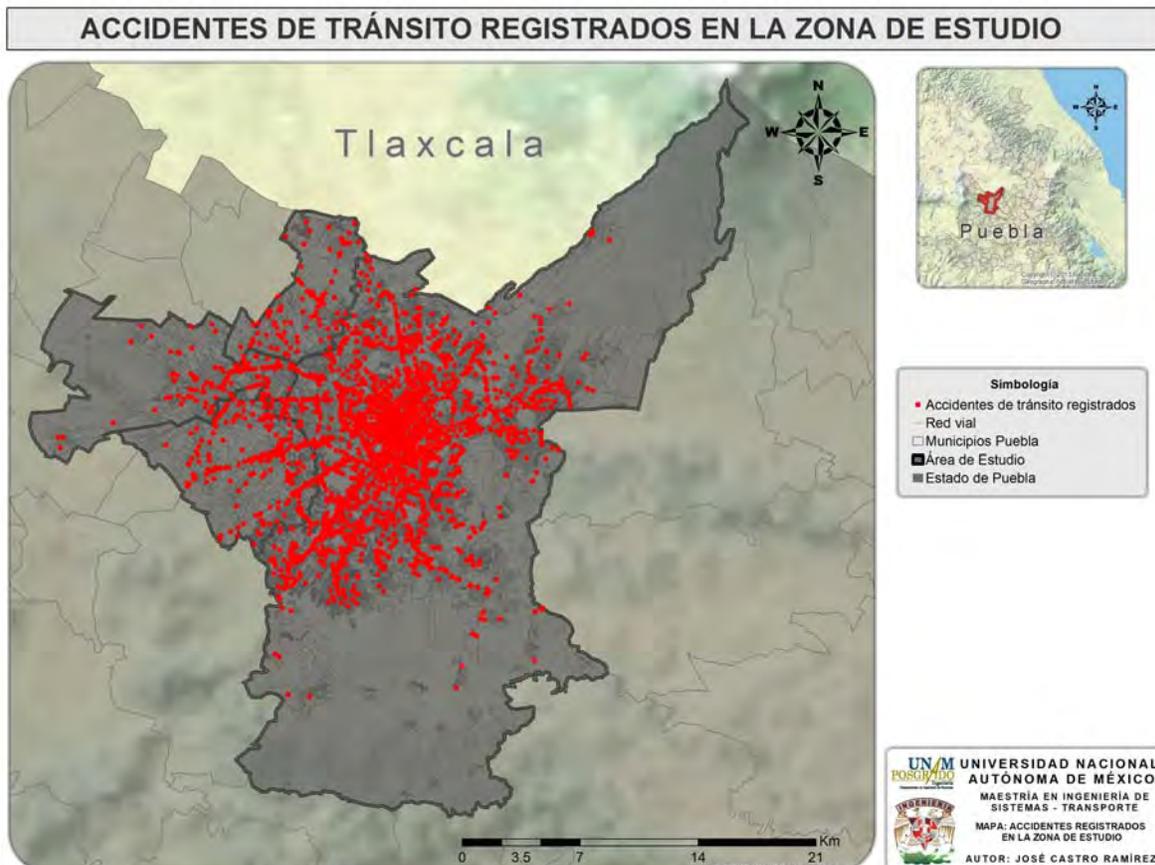
Característica del accidente	Descripción
Atropellamiento	Un peatón o un animal, es alcanzado o investido por un vehículo en movimiento con cualquier parte de su estructura.
Caída	Una o varias personas que viajan en un vehículo caen del mismo. Puede ser también interna.
Vuelco o volcadura	Ocurre cuando un vehículo que se encuentra en movimiento pierde el control y sus llantas dejan de hacer contacto con la superficie en la que se desplaza y hace contacto ya sea con el costado (vuelco lateral), sobre el techo (vuelco de campana) o el vehículo gira dando vueltas sobre cualquier parte del vehículo.
Derrape	El vehículo gira sobre su centro de masa o bien derrapa lateralmente, normalmente sucede cuando existen elementos extraños en la carretera como agua, aceite, tierra, etcétera.
Colisión o choque	Accidente entre dos o más vehículos en movimiento en el mismo sentido o en sentidos opuestos. Existen diferentes tipos de colisión como son: <ul style="list-style-type: none"> <li>A. Colisión trasera o por alcance: se presenta entre dos vehículos en movimiento en el mismo sentido</li> <li>B. Colisión frontal: se presenta entre dos vehículos en movimiento en sentidos opuestos</li> <li>C. Colisión en cadena o carambola: colisión de tres o más vehículos, uno detrás de otro. Puede ser por colisión trasera o puede incluir colisiones frontales</li> <li>D. Colisión lateral: se presenta entre vehículos en movimiento por carriles distintos, pero en el mismo sentido cuando uno de ellos inicia un desplazamiento a la izquierda o a la derecha</li> <li>E. Colisión transversal: involucra vehículos que van en direcciones con un ángulo de 90° u otro, generalmente en intersecciones, salidas de estacionamientos, etc.</li> </ul>
Choque con un objeto fijo	Accidente entre un vehículo en movimiento y un obstáculo sin movimiento; el obstáculo puede ser otro vehículo parado o un obstáculo fijo que normalmente están afuera de la vía.
Combinación	Donde puede haber accidentes que combinen dos o más de los tipos de accidente mencionados anteriormente

*Tabla 5 Clasificación de accidentes de acuerdo a su naturaleza*

*Fuente: Elaboración propia*

Considerando como base los datos históricos proporcionados por el RAVMex exhibidos en el apartado “Delimitación de la zona de estudio”, el 72% de los

accidentes registrados por el sistema RAVMex, se concentran en 4 municipios: Puebla, San Andrés Cholula, San Pedro Cholula y Cuautlancingo, además de que en conjunto éstos municipios forman una superficie continua lo cual permitirá realizar un análisis considerando la unión de los mismos como un conglomerado, la ubicación espacial de dichos municipios así como los siniestros viales registrados por el RAVMex se muestra el Mapa 3.



Mapa 3 Accidentes registrados en la zona de estudio  
Fuente: Elaboración propia

En el mapa anterior se exhibe la ubicación espacial de los 4,686 accidentes viales dentro de la zona de estudio; de los cuales, la mayor cantidad de accidentes viales en la zona de estudio se presentan en la zona centro y norte de la misma, principalmente corresponden a la zona centro del municipio de Puebla y la zona arqueológica de San Andrés Cholula.



La base de datos proporcionada por el RAVMex cuenta con 17 variables, las cuales detallan las particularidades de cada servicio cubierto por ambulancias administradas por SUMA, sin embargo, algunas variables como: Estado, estatus del servicio, número de calle, código postal, colonia y sentido vehicular no fueron consideradas para el diagnóstico de los servicios cubiertos; ya que los registros vacíos son considerables o la información no se consideró como relevante (primeras dos variables mencionadas). En la Tabla 6 se muestran las variables que integran la base de datos proporcionada por el RAVMex.

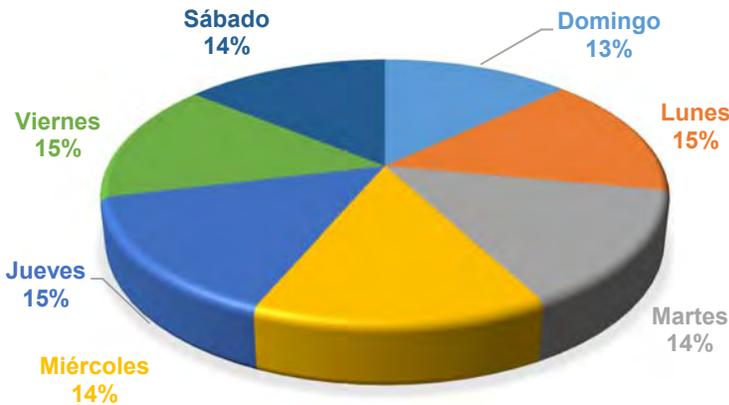
Variable	Campos con registro	Registros vacíos
Estado	100%	0%
Fecha	99%	1%
Estatus del servicio	100%	0%
Tipo de zona donde ocurrió el accidente	100%	0%
Calle	98%	2%
Número	0%	100%
Código postal	0%	100%
Colonia	99%	1%
Sentido	21%	79%
Kilometraje	1%	99%
Ubicación	100%	0%
Hora	100%	0%
Lugar	99%	1%
Estado de carpeta de rodamiento	99%	1%
Superficie de rodamiento	99%	1%
Condiciones climatológicas	98%	2%
Tipo de accidente	100%	0%

Tabla 6 Variables contenidas en base de datos del RAVMex  
Fuente: Elaboración propia.

El resumen de la información contenida en algunas variables de la base de datos del RAVMex se muestra a continuación.



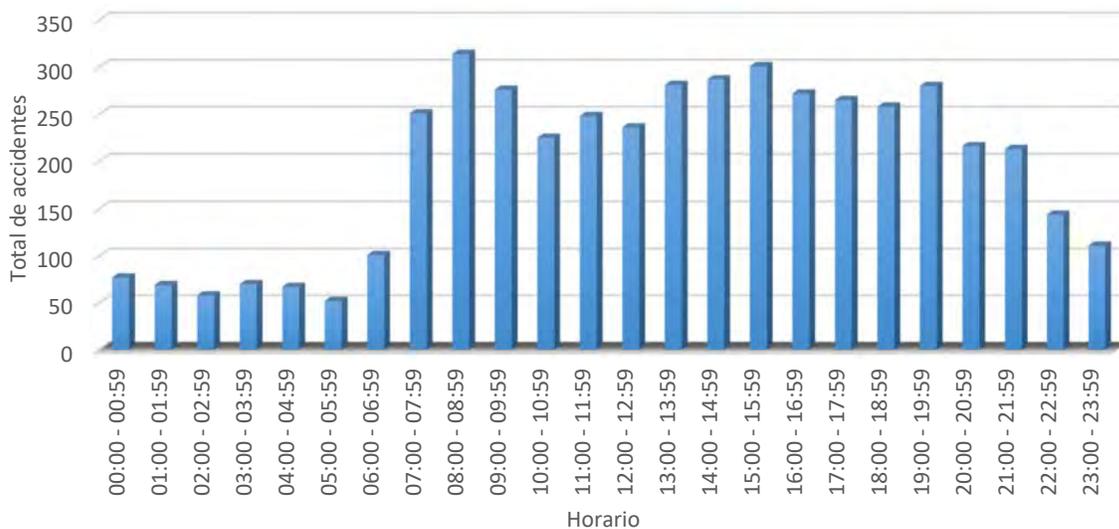
### DISTRIBUCIÓN DE ACCIDENTES POR DÍA



La Gráfica 6 muestra la distribución de ocurrencia de accidentes viales en función del día acontecimiento es estable para cada día de la semana, siendo el día domingo en que se registró menor número de acontecimientos.

Gráfica 6 Distribución de accidentes de tránsito por día  
Fuente: Elaboración propia.

### Distribución horaria de accidentes de tránsito

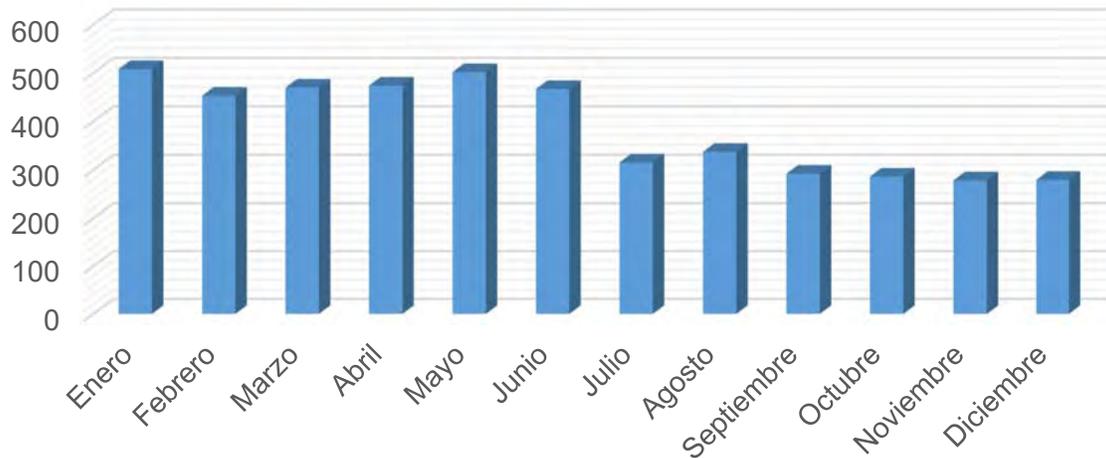


Gráfica 7 Distribución horaria de accidentes de tránsito  
Fuente: Elaboración propia.

Durante el periodo matutino en el horario de las 8:00 a 8:59 horas corresponde al lapso en el que se suscitaron la mayor cantidad de siniestros. Mientras que para el periodo vespertino; la hora de máxima ocurrencia de accidentes de tránsito se presenta de las 15:00 a 15:59 horas.

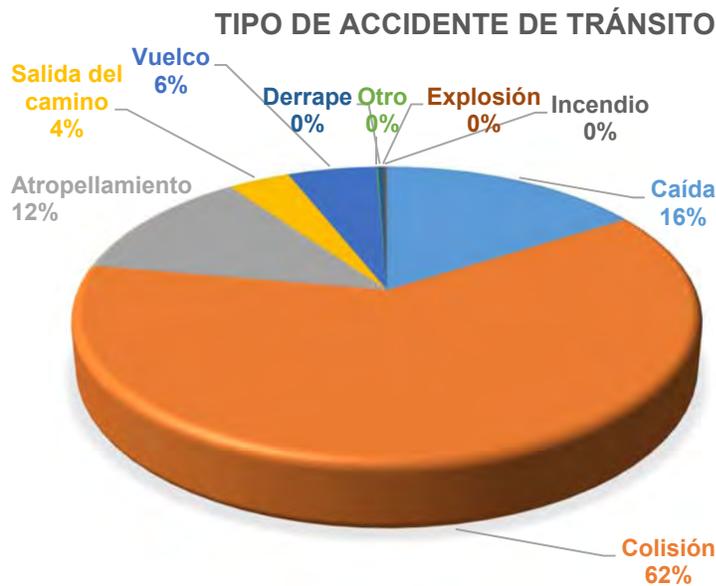


Distribución de accidentes de tránsito mensual



Gráfica 8 Distribución mensual de accidentes de tránsito  
Fuente: Elaboración propia.

El 62% de los siniestros contenidos en la base de datos de la RAVMex se acumulan durante el primer semestre del año. Durante dicho periodo se encuentra el periodo vacacional de invierno y semana Santa; lo que implica mayor número de personas y vehículos interactuando en zonas turísticas o carreteras.



Gráfica 9 Tipo de accidente de tránsito registrado  
Fuente: Elaboración propia.

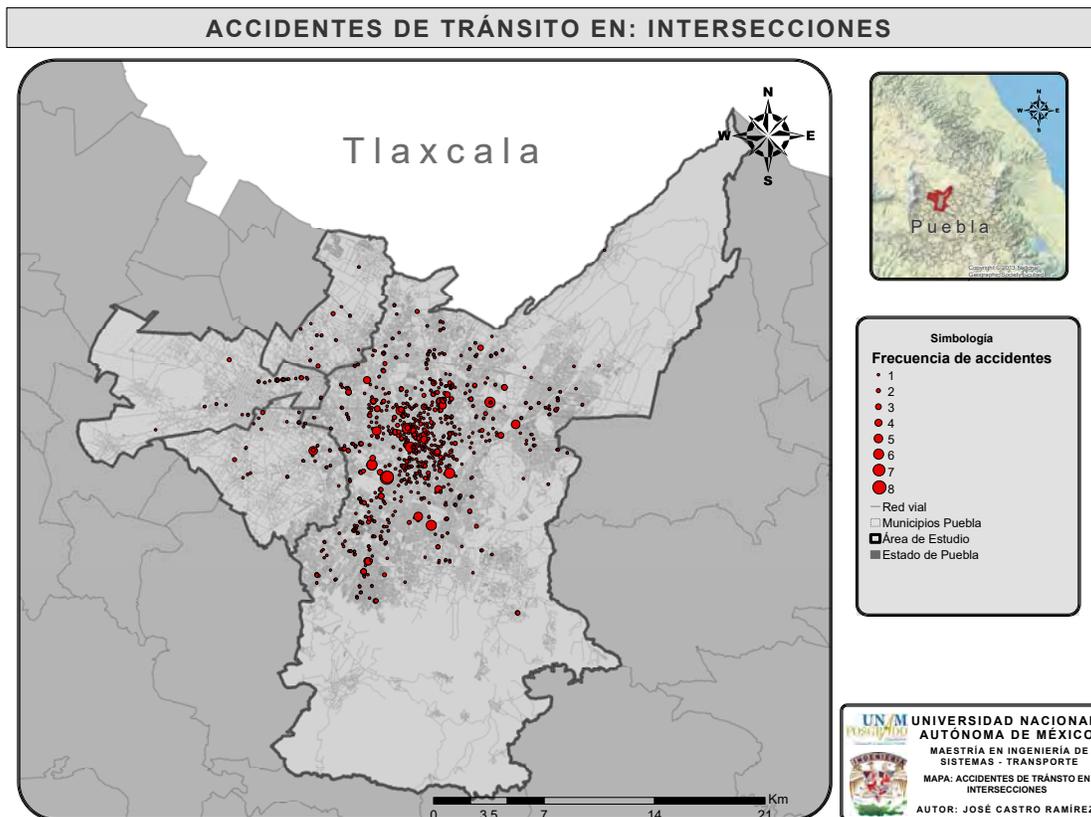
Las caídas, atropellamientos y colisiones (Gráfica 9) en conjunto representan el 90% de los siniestros viales ocurridos durante el periodo de análisis. A su vez los primeros dos tipos de accidentes involucran directamente a los usuarios los vulnerables de la infraestructura vial, aunque queda fuera del alcance del presente trabajo de investigación, se recomienda analizar detalladamente los servicios para proponer medidas de mitigación para dicho tipo de siniestros.



La Gráfica 10, indica que el 33% de los accidentes de tránsito registrados por el RAVMex ocurrieron en segmentos de curvas o intersecciones viales, y casi el doble de siniestros ocurrieron en tramos viales rectos.

*Gráfica 10 Lugar en donde ocurrió el accidente de tránsito*  
*Fuente: Elaboración propia.*

Durante el periodo de estudio, en 807 intersecciones se registraron un total de 1,144 siniestros de tránsito. La distribución espacial de dichos siniestros se muestra en el Mapa 4.



*Mapa 4 Accidentes de tránsito en intersecciones*  
*Fuente: Elaboración propia*



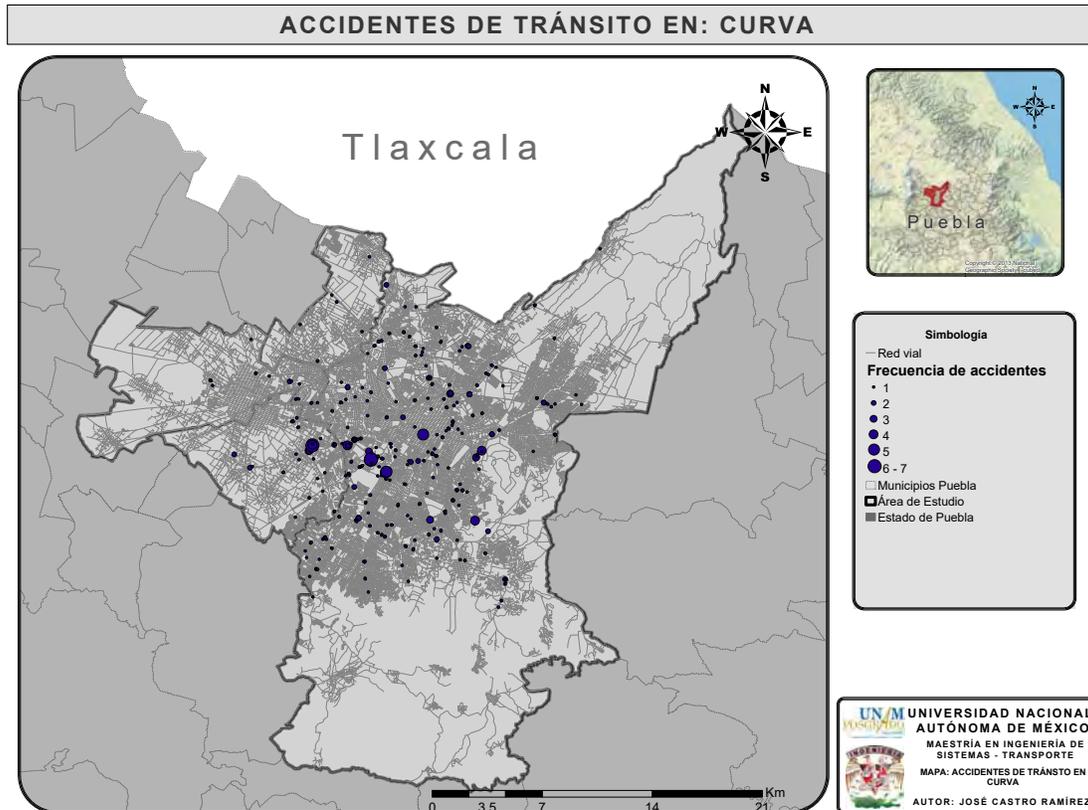
Con base en el mapa anterior, se identificó que en 11 intersecciones se acumulan el 5.9 % del total de siniestros ocurridos en intersecciones, las frecuencias de ocurrencia, tipo de vialidad y municipios se muestran en la Tabla 7.

Accidentes ocurridos	Intersección	Tipo de vialidad	Municipio
8	Puebla Atlixco – Periférico	Primaria - Primaria	San Pedro Cholula
7	Prolongación 11 Sur – Zaragoza	Secundaria - Local	Puebla
6	Blvd. Atlixcáyotl – Blvd del Niño Poblano	Primaria - Primaria	San Pedro Cholula
6	21 Sur – 13 Poniente	Secundaria - Secundaria	Puebla
6	Av. 31 Poniente – 11 Sur	Secundaria - Secundaria	Puebla
6	Av. 24 Sur – 30 Sur	Secundaria - Secundaria	Puebla
5	Prolongación 14 Sur - 73 Oriente	Secundaria - Local	Puebla
5	Blvd. Atlixco – Av. Reforma	Primaria - Secundaria	Puebla
5	Defensores de la República – Av. del Tecnológico	Primaria - Secundaria	Puebla
5	Blvd. 18 de noviembre – Blvd. Vicente Suárez	Primaria - Primaria	Puebla
5	Blvd. Atlixco – Av. 31 Poniente	Primaria - Secundaria	Puebla

Tabla 7 Accidentes de tránsito en intersecciones

Fuente: Elaboración propia

De los 429 siniestros de tránsito ocurridos en curvas dentro de la red vial, se detectó que el 8.4% de los mismos se concentran en 6 tramos viales. La distribución espacial de dichos siniestros se muestra en el Mapa 5.



Mapa 5 Accidentes de tránsito en curvas  
Fuente: Elaboración propia

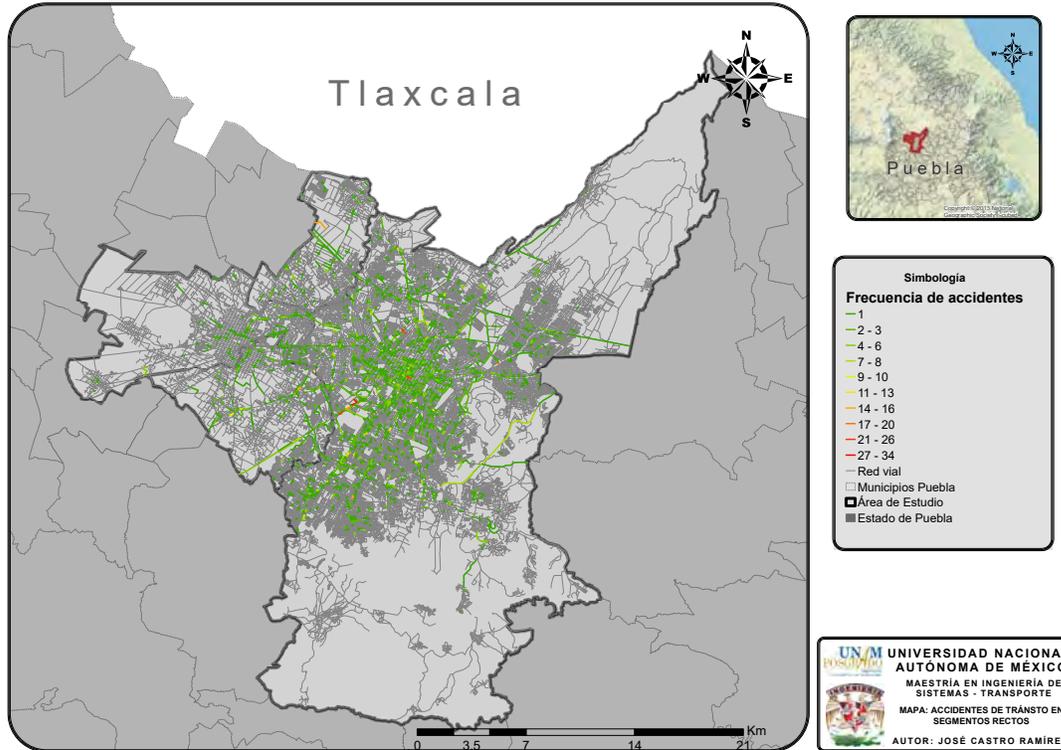
Las vialidades que acumulan la mayor incidencia de accidentes de tránsito en curvas se muestran en la Tabla 8.

Accidentes ocurridos	Intersección	Tipo de vialidad	Municipio
7	Periférico Ecológico	Primaria	San Pedro Cholula
7	Boulevard Atlixcáyotl	Primaria	San Pedro Cholula
6	Prolongación 11 Sur	Secundaria	Puebla
6	Avenida 13 Poniente	Secundaria	Puebla
5	Defensores de la República	Primaria	Puebla

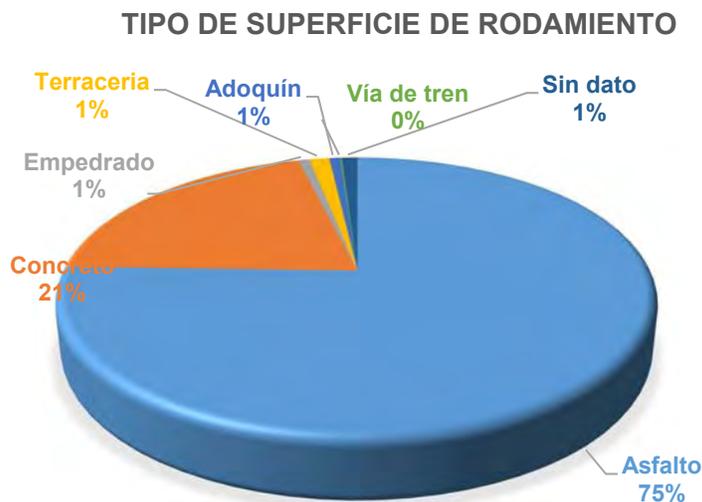
Tabla 8 Accidentes de tránsito en curvas  
Fuente: Elaboración propia

El 32.80% de los accidentes de tránsito en segmentos rectos de vialidades durante el periodo de estudio se acumulan en 5 vialidades; Periférico Ecológico, Boulevard Atlixcáyotl, Prolongación 11 Sur, Defensores de la República y Héroes del 5 de mayo. La distribución espacial de dichos siniestros se muestra en el Mapa 6.

**ACCIDENTES DE TRÁNSITO EN: SEGMENTOS RECTOS**

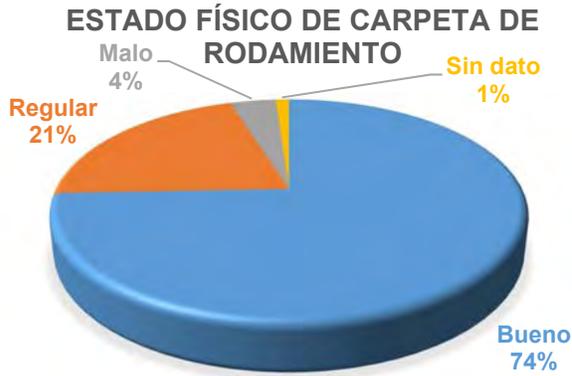


Mapa 6 Accidentes de tránsito en segmentos rectos  
 Fuente: Elaboración propia



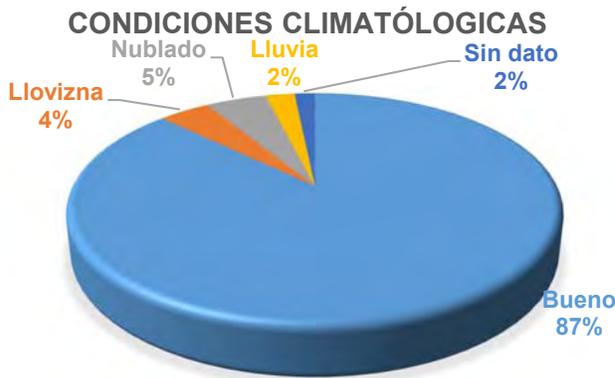
Gráfica 11 Tipo de superficie de rodamiento donde ocurrió el accidente de tránsito  
 Fuente: Elaboración propia.

El tipo de carpeta de rodamiento puede influir directamente en la ocurrencia de siniestros viales; debido a características propias de sus componentes, como: coeficiente de fricción, permeabilidad, resistencia, soporte, etcétera. En el presente caso de estudio tres de cada cuatro siniestros viales ocurrieron en vialidades asfaltadas; es importante mencionar que más de la tercera parte de la red vial en la zona de estudio cuenta con pavimento asfáltico.



Gráfica 12 Estado físico de carpeta de rodamiento donde ocurrió el accidente de tránsito  
 Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones físicas de la carpeta de rodamiento son importantes para el acontecimiento de accidentes de tránsito, la información contenida en la base de datos del RAVMex muestra que el estado físico de la carpeta de rodamiento en un 74% es bueno.



Gráfica 13 Condiciones climatológicas cuando ocurrió el accidente de tránsito  
 Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones climáticas prevalecientes en los sitios donde ocurrieron los accidentes fueron en un 87% buenas; lo que aumenta la posibilidad de que los siniestros hayan derivado de algún error cometido por el conductor, falla mecánica del vehículo o imprudencia de peatones.



Gráfica 14 Tipo de zona donde ocurrió el accidente de tránsito  
 Fuente: Elaboración propia.

La concentración de servicios en la parte central del municipio de Puebla; incrementa la interacción entre los pobladores: residentes y de sitios adyacentes a la capital para satisfacer sus necesidades básicas (comida, educación, trabajo, salud, etcétera); es por ello que la mayor cantidad de siniestro ocurrieron en zona urbana dentro de la zona de estudio.



En resumen, la base de datos del RAVMex contiene la siguiente información:

- El comportamiento de ocurrencia de siniestros de tránsito por día es estable
- Durante los horarios de 8:00 a 8:59 y de 15:00 a 15:59 corresponde a los horarios de mayor ocurrencia de accidentes de tránsito.
- El 62% de los siniestros registrados se presentaron durante el primer semestre del año.
- El 28% de los accidentes involucran a peatones, así mismo, el 62% de los accidentes registrados corresponden a colisiones.
- El 66% de los accidentes ocurrieron en segmentos rectos de vialidades.
- 75% de los accidentes ocurrieron sobre carpeta de rodamiento asfáltica. Mientras que el 74% de la carpeta de rodamiento se encontraba en buenas condiciones físicas.
- Las condiciones climáticas prevalecientes cuando ocurrieron los accidentes de tránsito fueron las adecuadas en el 87% de los mismos.

A continuación, se muestra en la Tabla 9 una clasificación de tipos de servicios respecto al horario de ocurrencia (ver apartado 3.4 Caracterización de red vial), la tabla refleja mayor cantidad de accidentes en horario valle; ello puede ser a causa de que durante dicho periodo las velocidades de recorrido en la red son mayores que en el horario pico.

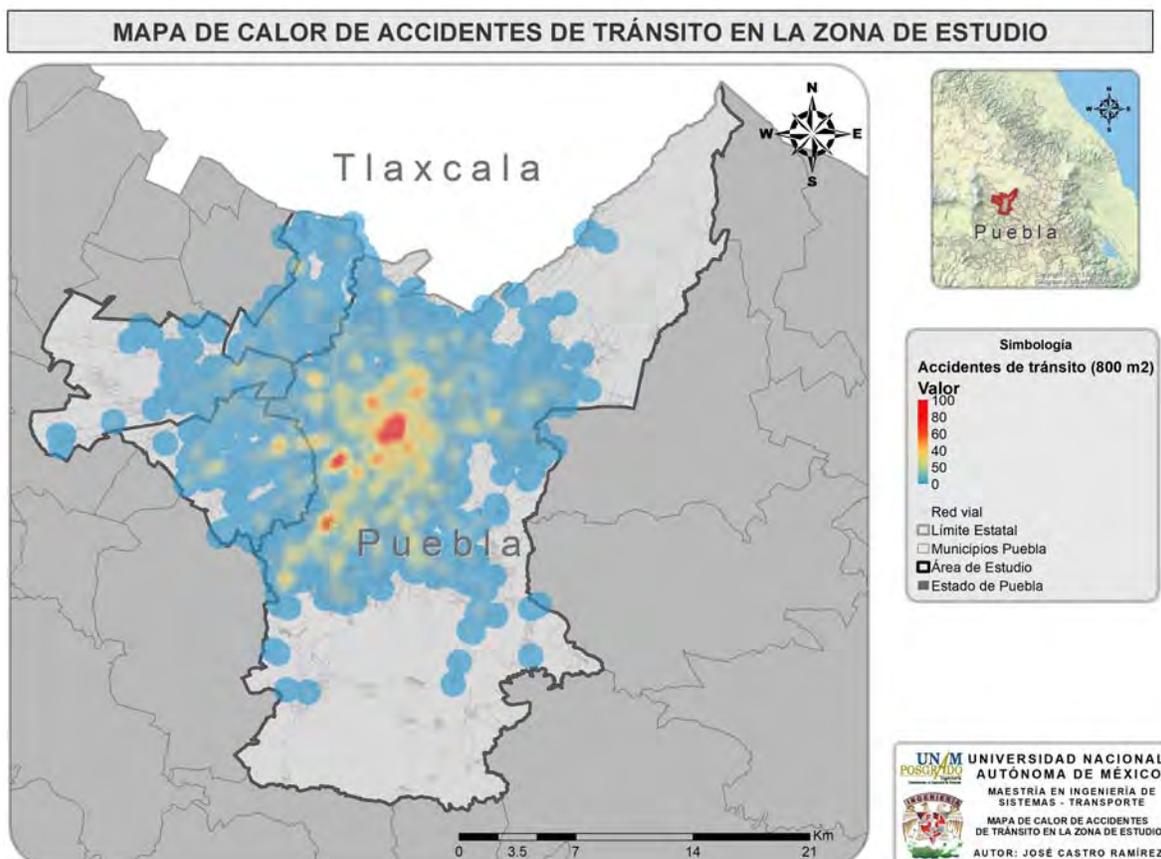
Tipo de siniestro	Hora pico	Hora valle	Total
Caída	7.92%	8.09%	16.01%
Colisión	28.92%	32.86%	61.78%
Atropellamiento	6.15%	6.25%	12.40%
Salida del camino	1.66%	2.11%	3.78%
Vuelco	2.48%	2.92%	5.40%
Otro	0.04%	0.04%	0.09%
Derrape	0.23%	0.11%	0.34%
Explosión	0.02%	0.02%	0.04%
Incendio	0.04%	0.13%	0.17%

Tabla 9 Tipo de siniestro vial por horario

Fuente: Elaboración propia

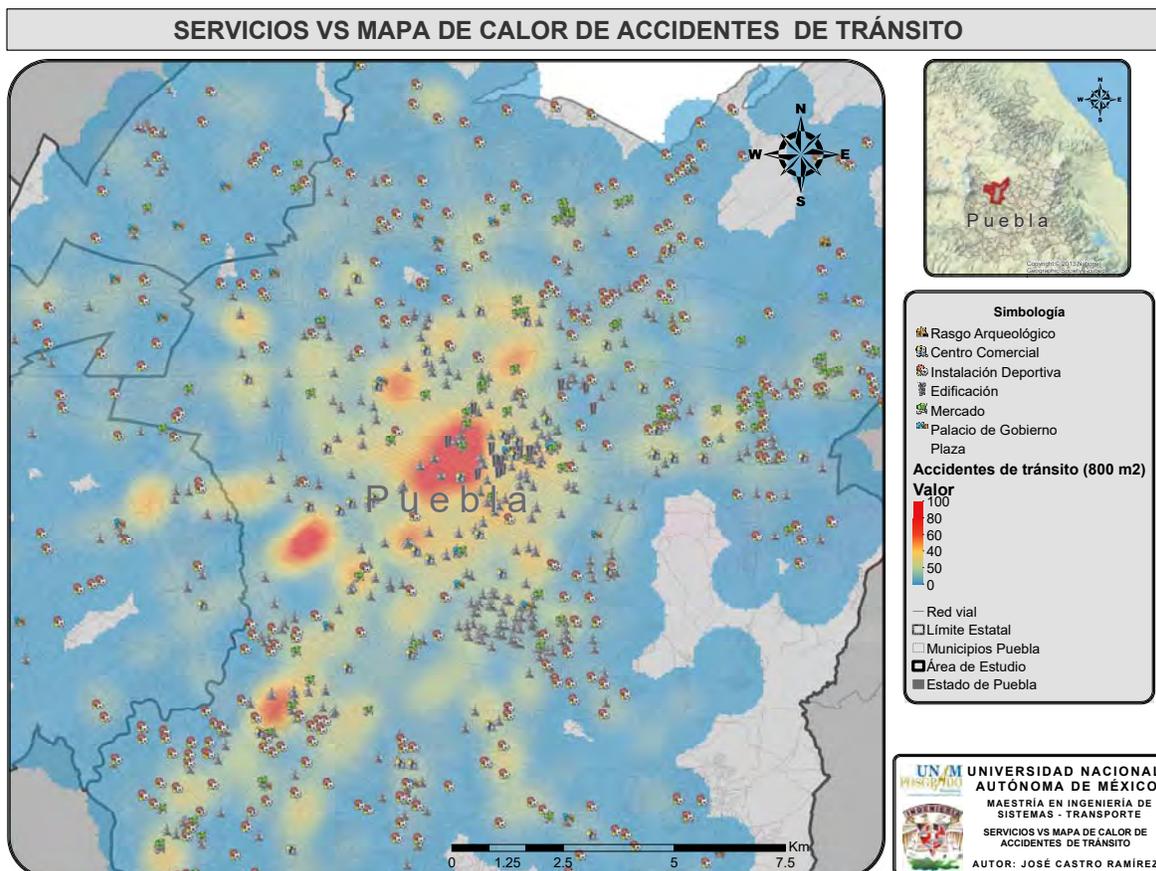
Con la finalidad de complementar el presente diagnóstico, se elaboró un mapa temático de calor (Mapa 7), en el cual, se observa la localización de puntos negros viales; los cuales corresponden a tramos de la red que presentan una frecuencia de accidentes significativamente superior a la media de tramos de características semejantes, y en los que, previsiblemente, una actuación de mejora de la infraestructura puede conducir a una reducción efectiva de la accidentalidad.

En el Mapa 7 se puede identificar fácilmente 3 tonalidades, que van de color azul-amarillo a rojo, las cuales indican la densidad de siniestros viales registrados en 800 m<sup>2</sup>, en donde, las tonalidades azules indican una densidad de 0 a 40 accidentes localizados en la zona en el área mencionada, mientras que las tonalidades amarillentas indican una densidad de 40 a 50 accidentes registrados en la zona, finalmente las tonalidades rojas indican una densidad de 60 a 100 accidentes dentro de 800 m<sup>2</sup>.



Mapa 7 Mapa de calor de siniestros viales registrados en la zona de estudio  
Fuente: Elaboración propia

En el Mapa 8 se puede apreciar que en zonas con tonalidades amarillentas a rojizas (mayor densidad de siniestros viales) existe una concentración importante de servicios (sitios arqueológicos, centro comercial, instalaciones deportivas, mercados, oficinas de gobierno y plazas) respecto a las zonas con tonalidades azules; en éstas zonas la ocurrencia de accidentes de tránsito es más dispersa, esto puede responder a que se tiene una menor interacción de vehículos o peatones; debido a que las zonas no podrían considerarse como un polo de atracción o generación de viajes para satisfacer las necesidades de la población.



Mapa 8 Mapa de servicios vs calor de siniestros viales registrados en la zona de estudio

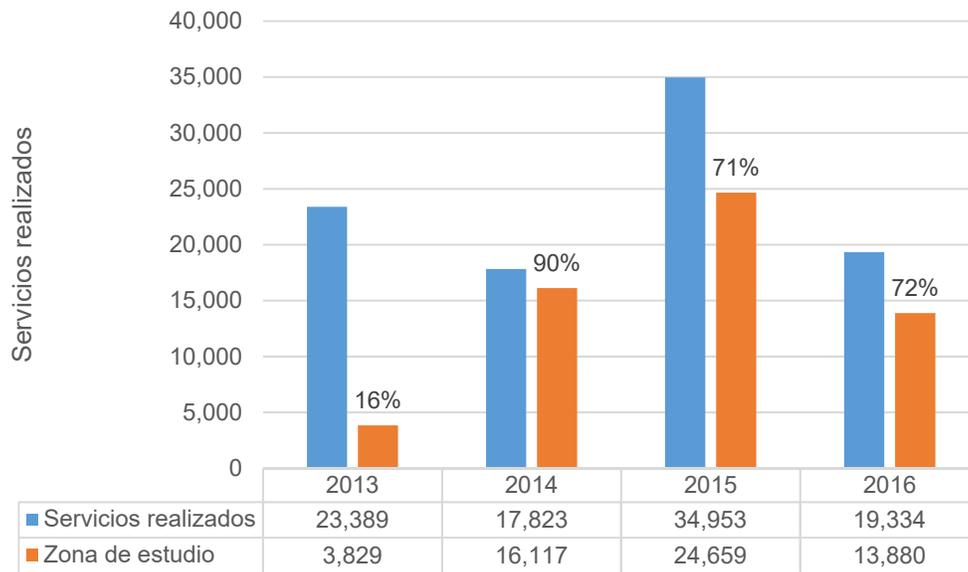
Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, se consultó información de la Secretaría de Salud del Estado de Puebla durante el año 2013 (Gráfica 15), en el cual se reportó que la demanda de servicios de AMP atendida por SUMA fue de 23,389 servicios; de los cuales el 16% de ellos se realizaron dentro de la zona de estudio, para el año 2014 se realizaron 17,823 servicios; equivalentes a una disminución del 24% respecto a los servicios



realizados en el año 2013, en tanto para el año 2015 se realizaron 34,953 servicios; equivalentes a un incremento del 96% de servicios respecto al año 2014, finalmente para el año 2016 se disminuyeron en un 45% el número de servicios; equivalentes a 19,334 servicios.

### Registro histórico de servicios realizados por el SUMA



*Gráfica 15 Registro histórico de servicios realizados por el SUMA en el Estado de Puebla*  
*Fuente: (Secretaría de Salud del Estado de Puebla, 2017)*

Actualmente los vehículos de AMP administrados por la SSEP no cuentan con sitios fijos (“bases”) en los cuales permanezcan en espera de que alguna persona solicite un servicio de AMP, es decir, los vehículos permanecen en movimiento a lo largo de la red vial mientras no realizan la cobertura de algún servicio.

El que los vehículos de AMP se encuentren en constante movimiento en la red vial podría implicar mayores costos para la SSEP, entre ellos: incremento en el consumo de combustible, desgaste en neumáticos, mayor desgaste en motor, mantenimiento preventivo y correctivo del vehículo. Así mismo, se puede acrecentar el tiempo de respuesta de los servicios de AMP, ya que al permanecer el movimiento sin contar con zonas de cobertura asignadas para cada vehículo algunas zonas pueden quedar fuera de una cobertura de los 10 minutos de platino.



### 3.3 Metodología para levantamiento de datos de velocidad de operación

Para realizar el estudio de velocidades, se utilizó la metodología del vehículo flotante, la consiste en cronometrar el tiempo de recorrido de cada tipo de vehículo, es decir, el vehículo de prueba "flota" en el flujo tránsito, pasando tantos vehículos como los que lo pasan.

El levantamiento de velocidades de operación en la zona de estudio se realizó con siete vehículos particulares operados por personas residentes de la zona de estudio en diferentes periodos del día, cada vehículo recorrió un promedio de 12 horas del día, el estudio se realizó durante una semana hábil de actividades en la zona (25-27 de abril de 2017) los días: martes, miércoles y jueves.; la selección de los días muestreados responde a que en dichos días la variación respecto al flujo vehicular se puede considerar estable.

#### 3.3.1 Preparación de instrumentos para levantamiento de información en campo

Para el levantamiento de información se utilizó un GPS (Global Positioning System, "Sistema de Posicionamiento Global") integrado a teléfonos celulares inteligentes (Motorola y Huawei) y aplicaciones móviles Oruxmaps y GPS Test.

Con la finalidad de captar información precisa de posicionamiento en los recorridos realizados es necesario realizar las siguientes configuraciones:

1. Descargar e instalar la aplicación OruxMaps desde la playstore de Android; en el teléfono que será utilizado para el levantamiento de información.



Figura 4 Aplicación móvil Oruxmaps

Fuente: Captura propia en aplicación Oruxmaps

- i) Una vez instalada la aplicación se debe realizar la configuración de la misma, para ello se debe ir a la opción “Configuración general”→”Sensores”→”Gps” y establecer la configuración siguiente (ver figuras 5-7):
- “Tiempo mínimo”: 0 seg.
  - “Distancia mínima”: 0 m
  - “Mínima precisión”: 100 m



Figura 5 Menú Configuración global  
Fuente: Captura propia en aplicación Oruxmaps

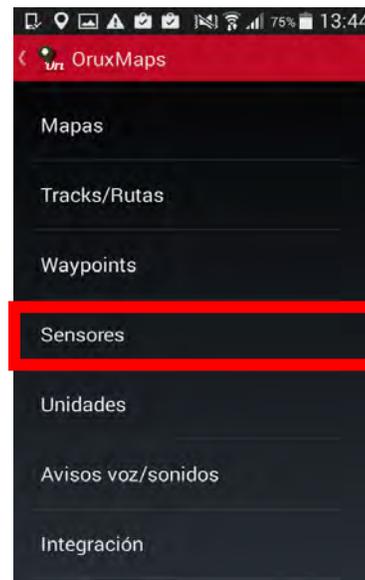


Figura 6 Opción “Sensores”  
Fuente: Captura propia en aplicación Oruxmaps

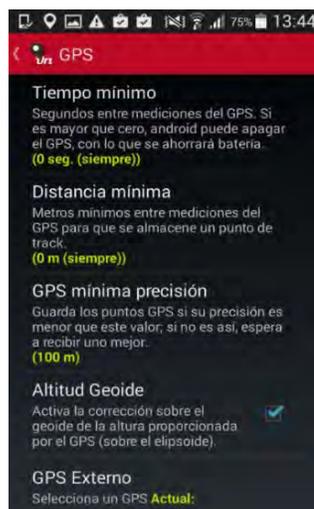


Figura 7 Menú GPS  
Fuente: Captura propia en aplicación Oruxmaps

- ii) Ir a la "Configuración Global" → "Tracks/Rutas" y establecer la configuración siguiente (ver figuras 8 y 9):
- "Auto KML": palomear
  - "Pegar al terreno KML ": palomear
  - "Auto GPX": palomear
  - "Distancia AutoSegmento": 0
  - "Tiempo AutoSegmento": 0
  - "AutoSegmento, no movimiento": 0
  - "AutoGuardado": .25

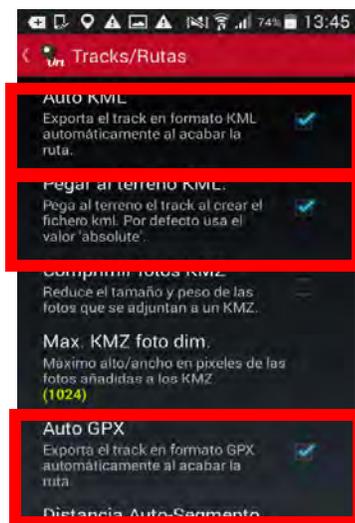


Figura 8 Menú Configuración global  
Fuente: Captura propia en aplicación Oruxmaps

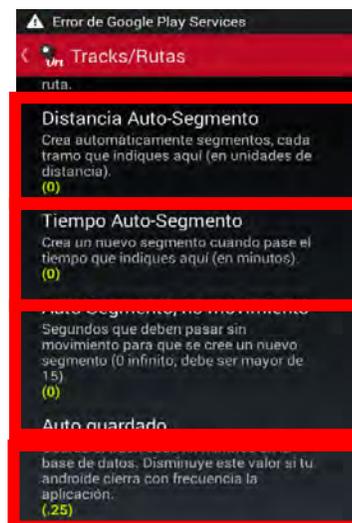
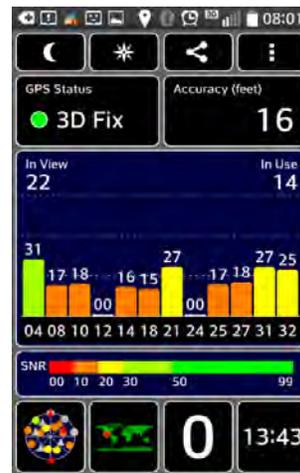


Figura 9 Menú Tracks/Rutas  
Fuente: Captura propia en aplicación Oruxmaps

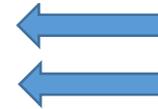
## 2. Descargar e instalar la aplicación móvil para sistema operativo Android

### “GPS Test”

- Antes de iniciar la grabación se debe asegurar que el dispositivo Android ya recibe su posición correctamente, para esto pueden auxiliarse de otras apps como "GPS test", verificando que recibe señal satelital correcta de al menos 5 satélites en uso (en la aplicación GPS Test se verán en color verde) y una exactitud de 33 pies como mínimo (Figura 10)



Satélites en uso



Precisión

Figura 10 Aplicación GPS Test

Fuente: Captura propia en aplicación GPS Test

### 3.3.2 Grabación de recorridos realizados

Una vez realizadas las configuraciones pertinentes, antes de iniciar con los recorridos en el estudio de velocidades se tiene que realizar las siguientes acciones en las aplicaciones mencionadas:

El primer paso para iniciar la grabación del recorrido es activar el GPS del dispositivo móvil, como se muestra en la Figura 11.



Figura 11 Activación de GPS en el dispositivo móvil

Fuente: Captura propia en aplicación Oruxmaps

Como se mencionó en el apartado anterior, antes de iniciar el recorrido es necesario probar la correcta captación de señal de los satélites disponibles, para ello se verifico la intensidad de las mismas con la aplicación GPS Test, el resultado de la captación de satélites se muestra en la Figura 12.

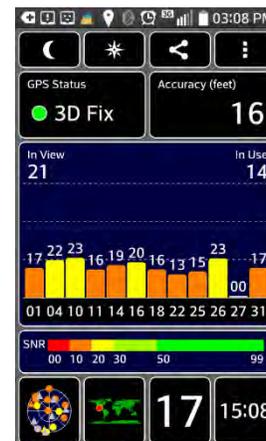


Figura 12 Captación de señal GPS

Fuente: Captura propia en aplicación GPS Test

Una vez que las condiciones de captación de señal fueron las adecuadas para iniciar el recorrido; se ejecutó la aplicación móvil OruxMaps, posteriormente se activan las opciones mostradas en las siguientes figuras:



Figura 13 Activación de GPS en aplicación Oruxmaps  
Fuente: Captura propia en aplicación GPS Test

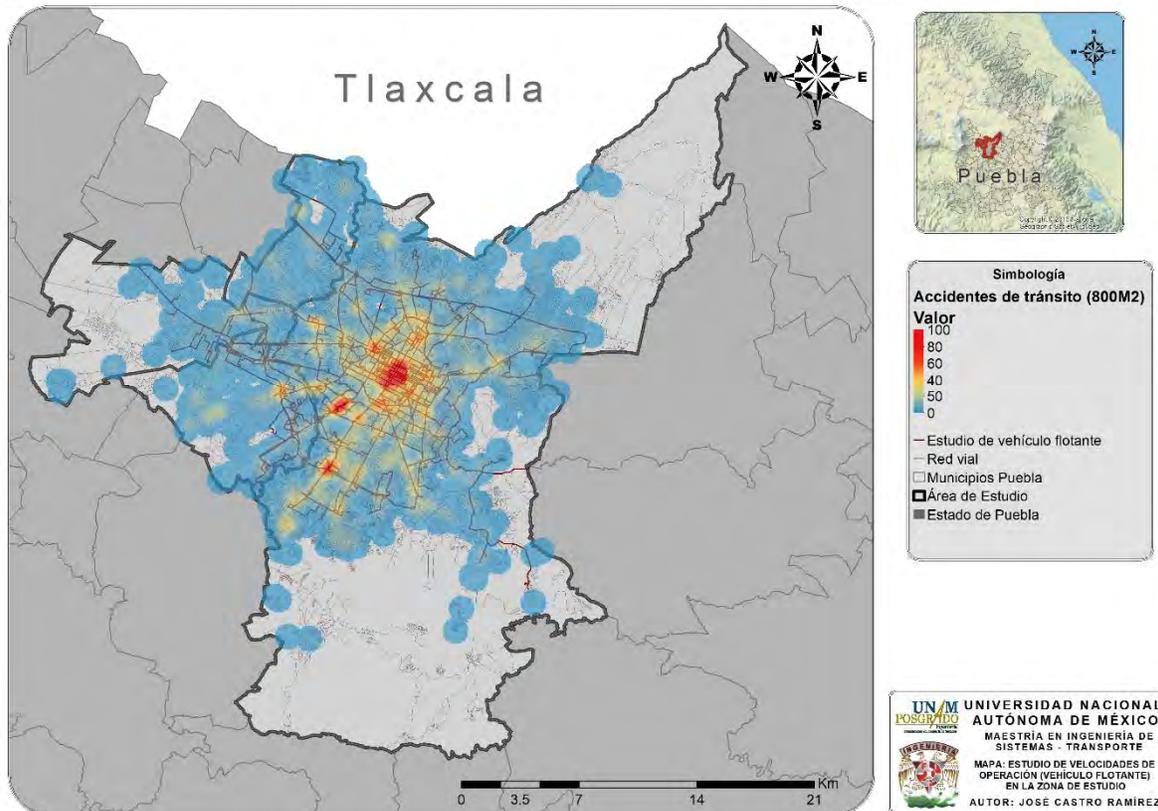


Figura 14 Inicio de grabación  
Fuente: Captura propia en aplicación GPS Test

Para reducir la variabilidad que pueda existir a causa de la manipulación del instrumento de medición (teléfono móvil), así mismo, los registros de las velocidades de recorrido, durante los recorridos el teléfono móvil se colocó sobre el tablero frontal de los vehículos.

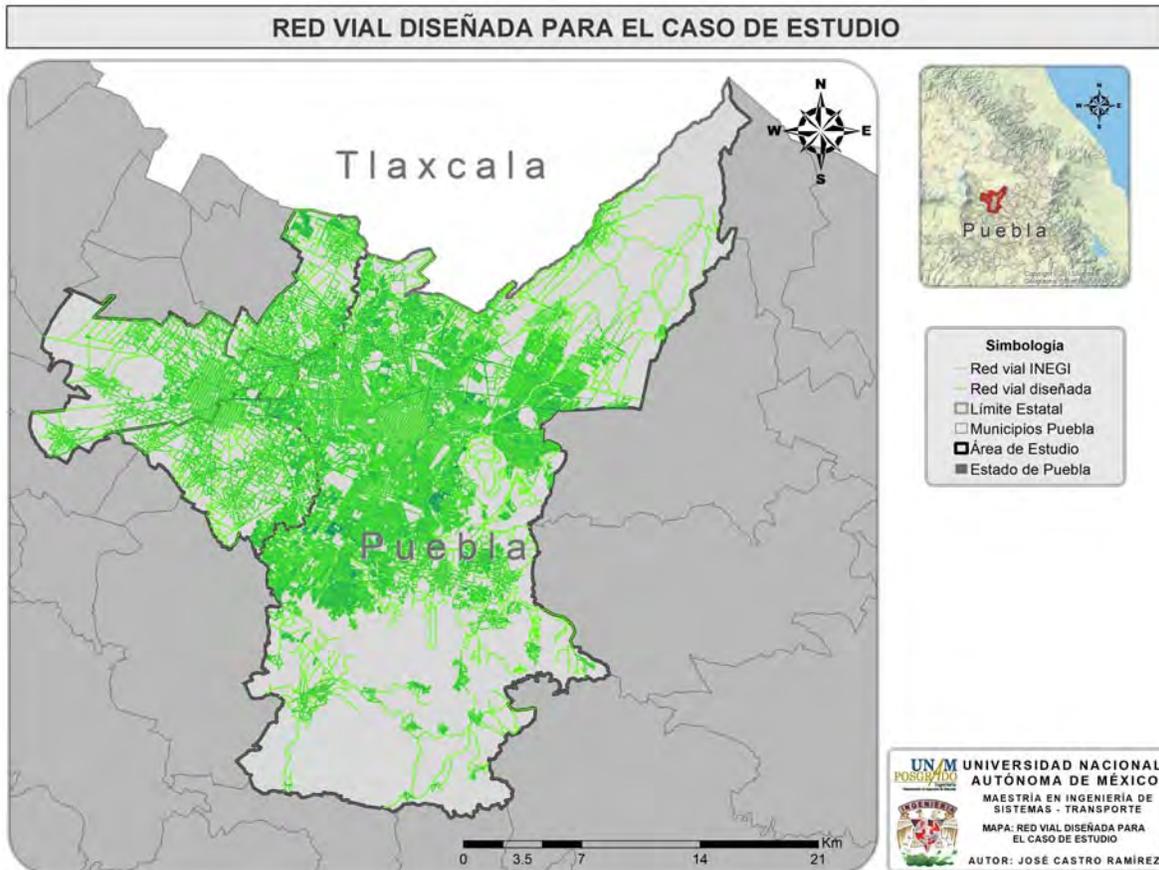
En el Mapa 9 se muestran los recorridos realizados durante el estudio de velocidades dentro de la zona de estudio, en dicho estudio se procuró recorrer la misma vialidad al menos 2 veces por sentido vehicular durante cada periodo (pico y valle) de levantamiento. Así mismo, se contrasta el Mapa 7 con dichos recorridos; con el objetivo de verificar que se levantara la mayor cantidad de información dentro de los buffers con tonalidades amarillo-rojo.

ESTUDIO DE VELOCIDADES DE OPERACIÓN (VEHÍCULO FLOTANTE) EN LA ZONA DE ESTUDIO



### 3.4 Caracterización de red vial

Para el caso de estudio se construyó una red vial digital de la zona de estudio, para ello, se consideró como base los mapas ofrecidos por: INEGI, Google Maps y Open Street Maps; al traslapar la distribución espacial de las tres fuentes de información se obtuvo mayor detalle de la infraestructura vial existente, caso contrario; a utilizar solamente la red vial de una sola fuente de información. La red vial diseñada cuenta con diferentes atributos, como: nombre de la vialidad (arco), longitud del arco, número de carriles, ancho de calzada, tipo (categorización) de vialidad, sentidos de circulación, velocidad máxima permitida y velocidad de operación de operación, tales atributos se consideraron como relevantes para el caso de estudio, debido a que fueron utilizados para alimentar el modelo matemático que se fue utilizado para las propuestas de ubicación de ambulancias en la zona de estudio. La red vial diseñada se muestra en el Mapa 10.



Mapa 10 Red vial diseñada para la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia

Durante el estudio de velocidades de recorrido, se consideró fundamental muestrear las vialidades localizadas dentro de los buffers del Mapa 7 con tonalidades amarillas hacia color rojo; debido a que en dichas zonas se tiene mayor recurrencia de siniestros viales.

Con el estudio de velocidades se caracterizó la red de estudio con un parámetro de suma importancia para la localización de instalaciones de emergencia: tiempo de viaje. La temporalidad del estudio fue clasificada en dos categorías de análisis:

1. Horario Valle: comprende los intervalos de: 0:01-5:59, 9:00-11:59, 14:00-15:59, 18:00-18:59, 21:00-23:59 horas
2. Horario de Pico: comprende los intervalos de: 6:00-8:59, 12:00-13:59, 16:00-17:59, 19:00-20:59 horas



Además, para tener mayor desagregación en los resultados de dicho estudio, se llevó a cabo una jerarquización por tipo de vialidades, así como la asignación de las velocidades máximas permitidas según su clasificación con base en el reglamento de tránsito del Estado de Puebla, a continuación, se muestra el detalle de dicha tipificación:

Tipo de vialidad	Jerarquización	Velocidad máxima permitida (kms/h)	Velocidad promedio capturada en campo (kms/h)	Longitud (kms) de red
Autopista	Carreteras	100	41	142.30
Carretera Federal				
Anillo Periférico	Primarias	80	43	257.00
Boulevard				
Camino Real				
Avenida	Secundarias	70	33	986.8
Calzada				
Prolongación				
Diagonal				
Circuito				
Andador	Locales	20	31	5290.00
Calle				
Callejón				
Cerrada				
Privada				
Retorno				

*Tabla 10 Clasificación por tipo de vialidad en la zona de estudio  
Fuente: Elaboración propia.*

Es importante mencionar que la red vial de estudio que es utilizada para la solución del caso de estudio es la misma con respecto al número de arcos y nodos sin importar el horario, sin embargo, dadas las condiciones de tránsito en función del horario del día, se utilizaron dos redes de estudio; en donde, cada una de ellas representa las condiciones prevalecientes respecto a las velocidades de operación para cada uno de los dos horarios (valle y pico) de análisis.

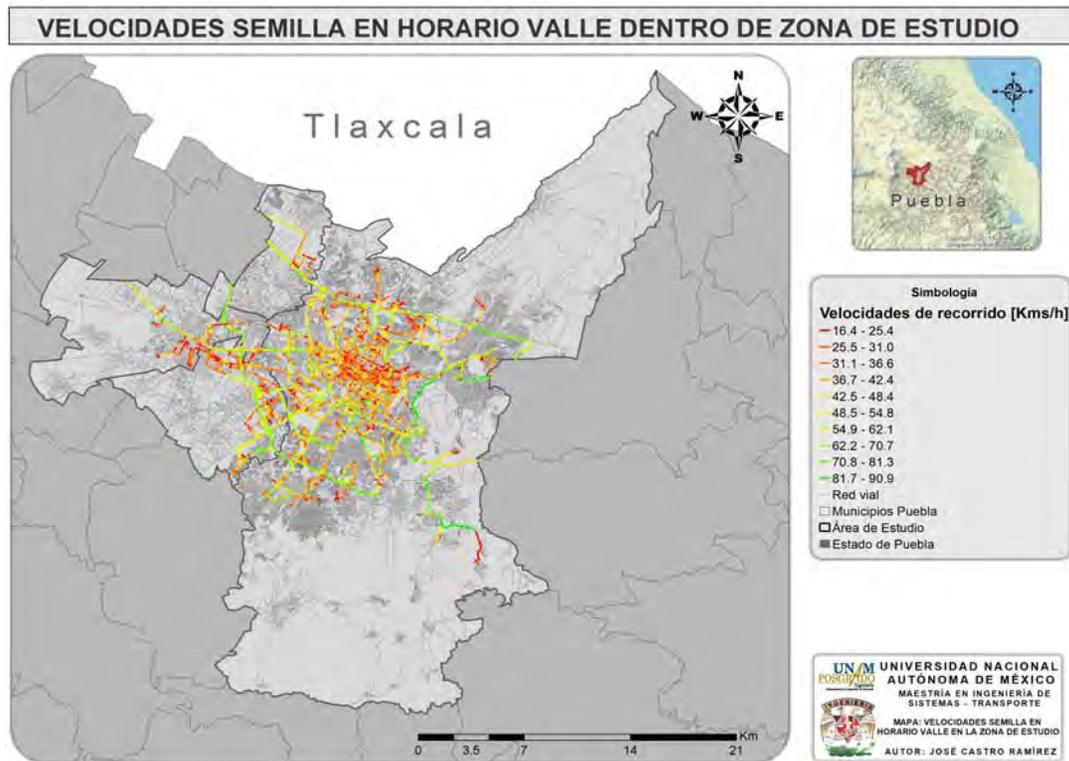
### 3.4.1 Red vial en Horario Valle

Derivado de recorrer 2,520.3 kms en la red de estudio durante el periodo valle, el análisis de las velocidades de recorrido obtenidas en la zona de estudio es mostrado en siguiente Tabla 11.

Tipo de vialidad	Velocidad (kms/h)	Número de accidentes de tránsito registrados
Carreteras	49.4	65
Primarias	51.4	331
Secundarias	41.3	742
Locales	38.1	1324

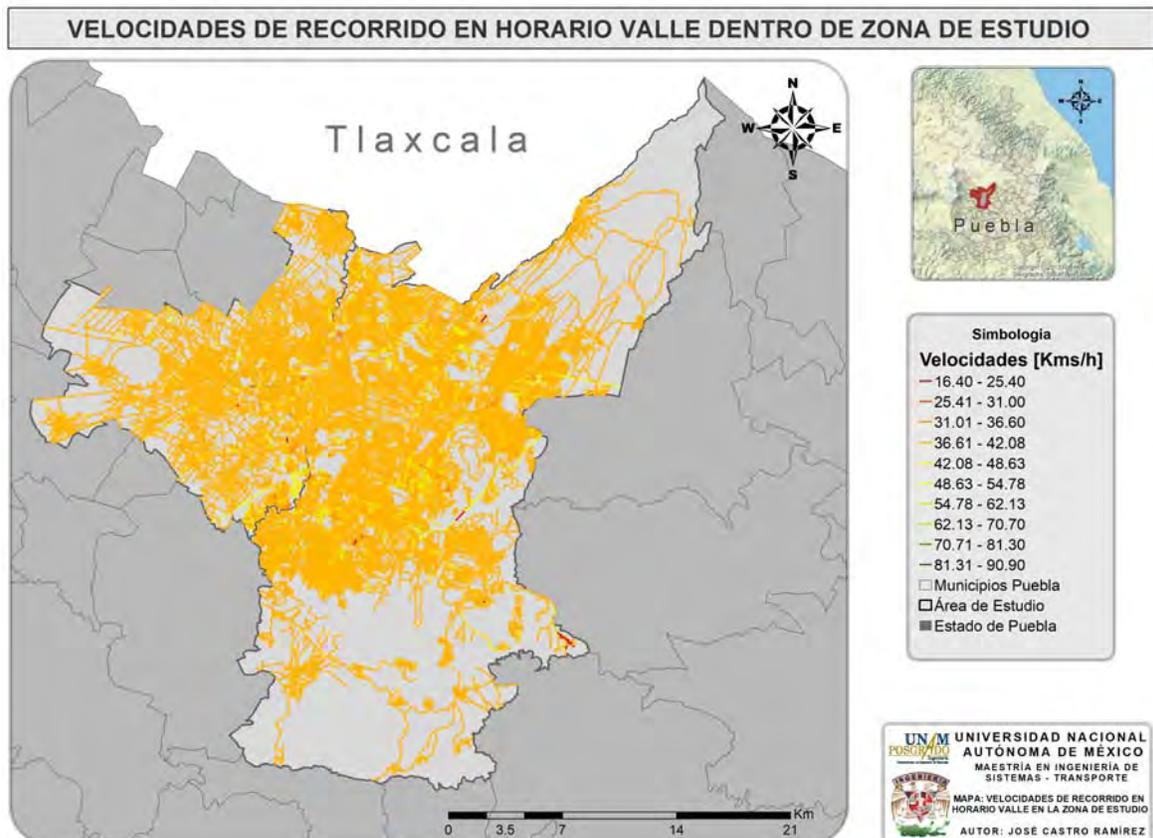
Tabla 11 Resumen de velocidades de recorrido dentro de la zona de estudio  
 Fuente: Elaboración propia.

La distribución espacial de las vialidades muestreadas en el análisis se muestra en el Mapa 11, en el cual con base a la escala de tonalidades utilizadas para la representación de la velocidad de operación se muestra que predominan la gama de color naranja – verde.



Mapa 11 Velocidades semilla dentro de horario valle en la zona de estudio  
 Fuente: Elaboración propia.

Las vialidades adjuntas (mostradas en el mapa anterior) al análisis de velocidades de recorridos durante el periodo valle, representan una muestra del 8.82% de la red vial total de la zona de estudio. Con las velocidades obtenidas según el tipo de categorización realizada en la Tabla 10; se obtuvo un promedio para cada jerarquía, el cual posteriormente fue asignado al resto de la red vial con la misma jerarquía dentro de la zona de estudio. El resultado de la expansión de las velocidades semilla se muestra en el Mapa 12.



Mapa 12 Velocidades extendidas en horario valle en la zona de estudio  
Fuente: Elaboración propia

Las velocidades obtenidas con la expansión de las velocidades semillas fueron utilizadas como base para calcular el tiempo de viaje en la red de estudio desde cualquier par origen-destino dentro de la red vial de la zona de estudio. La velocidad promedio de operación en el horario valle es de 49.1 kms/h.

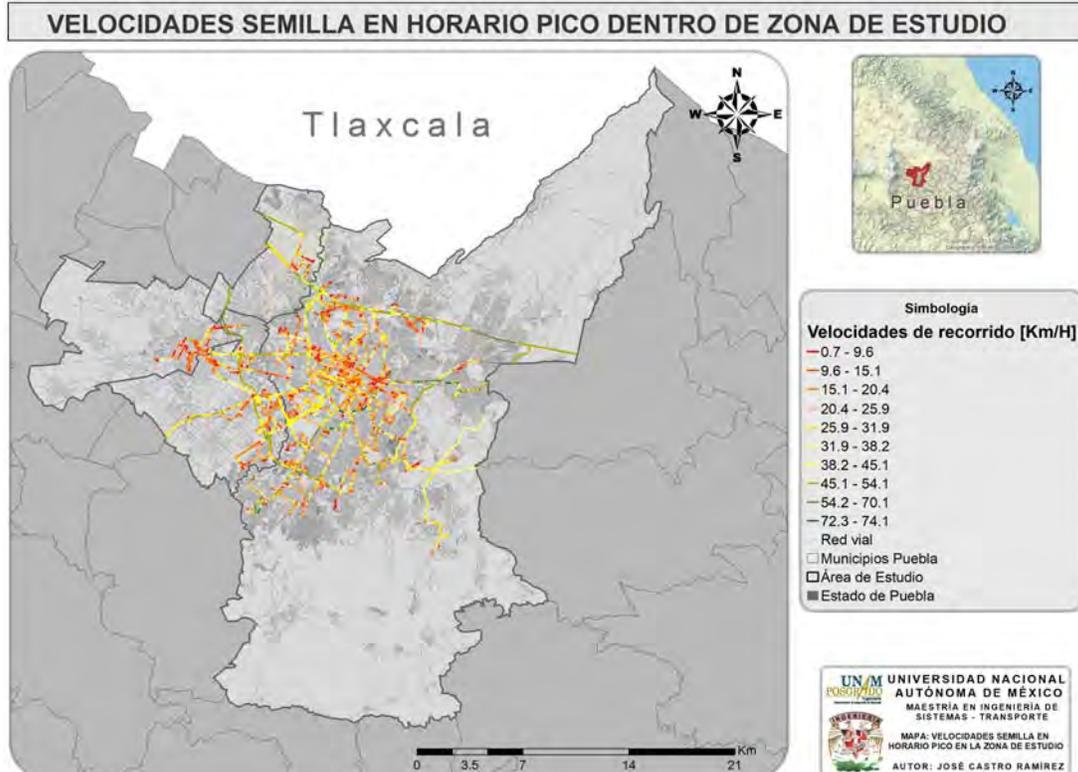
### 3.4.2 Red vial en Horario Pico

Derivado de recorrer 2,050.08 kms en la red de estudio durante el periodo pico, el análisis de las velocidades de recorrido obtenidas en la zona de estudio es mostrado en la Tabla 12.

Tipo de vialidad	Velocidad (kms/h)	Número de accidentes de tránsito registrados
Carreteras	32.7	48
Primarias	34.6	293
Secundarias	26.2	675
Locales	23.1	1208

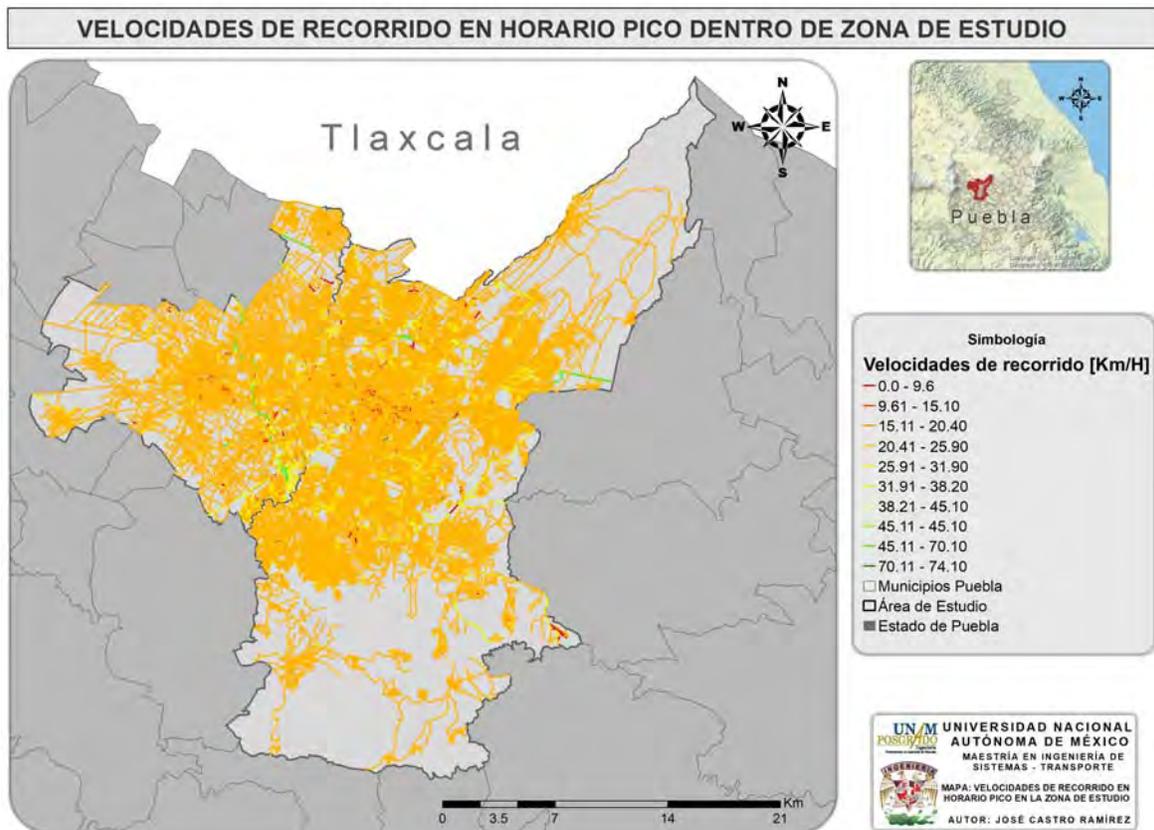
Tabla 12 Resumen de velocidades de recorrido dentro de la zona de estudio  
Fuente: Elaboración propia.

Las distribuciones espaciales de las vialidades muestreadas en el análisis se colocaron en el Mapa 13, en el cual con base a la escala de tonalidades utilizadas para la representación de la velocidad de operación se muestra que predominan la gama de color rojo - naranja.



Mapa 13 Velocidades semilla dentro de horario pico en la zona de estudio  
Fuente: Elaboración propia

Las vialidades adjuntas al análisis de velocidades de recorridos durante el periodo pico, representan una muestra del 7.55% de la red vial total de la zona de estudio. Con las velocidades obtenidas según el tipo de categorización (Tabla 10) se obtuvo un promedio para cada jerarquía y posteriormente se asignó al resto de la red vial dentro de la zona de estudio. El resultado de la expansión de las velocidades semilla se muestra en el Mapa 14.



Mapa 14 Velocidades extendidas en horario pico en la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia

Las velocidades obtenidas con la expansión de las velocidades semillas fueron utilizadas como base para calcular el tiempo de viaje en la red de estudio desde cualquier par origen-destino dentro de la red vial de la zona de estudio. La velocidad promedio de operación en el horario pico es de 23.98 kms/h.



### 3.5 Instalaciones factibles para localización de ambulancias

La SSEP reportó que durante el año 2016 en la ZMEP el parque vehicular de ambulancias en operación fue de 22 vehículos, actualmente la ZMEP está integrada por 18 municipios del Estado, dentro de los cuales se encuentran los 4 municipios de la zona de estudio. La Tabla 13 muestra el número de accidentes de tránsito registrados en cada uno de los municipios, así como su proporción respecto al total de siniestros registrados en la ZMEP, sin embargo, existen municipios sin registro de accidentes viales. La propuesta de asignación de ambulancias dentro de la ZMEP es en función del número de siniestros registrados para cada municipio, es importante mencionar que para los municipios en los que no se cuenta con registro de siniestro viales como lo son los últimos 5 municipios en la Tabla 13; se propone, que sea asignado un vehículo por municipio para cubrir algún siniestro vehicular dentro de cada municipio, a excepción de los municipios Chiautzingo y San Felipe Teotlalcingo que su número de habitantes y extensión territorial es pequeña con respecto a los otros municipios que integran la ZMEP, a este par de municipios se propone que un vehículo cubra sus siniestros viales.

Municipio	Siniestros registrados	Proporción de accidentes
<b>Puebla</b>	<b>6094</b>	<b>84.53%</b>
<b>Cuatlancingo</b>	<b>378</b>	<b>5.24%</b>
<b>San Pedro Cholula</b>	<b>378</b>	<b>5.24%</b>
<b>San Andrés Cholula</b>	<b>320</b>	<b>4.44%</b>
Huejotzingo	10	0.14%
San Martín Texmelucan	9	0.12%
San Salvador el Verde	7	0.10%
Coronango	6	0.08%
Amozoc	3	0.04%
Domingo Arenas	1	0.01%
San Miguel Xoxtla	1	0.01%
Tepatlatxco de Hidalgo	1	0.01%
San Gregorio Atzompa	----	----
Ocoyucan	----	----
Tlaltenango	----	----
Chiautzingo	----	----
San Felipe Teotlalcingo	----	----
<b>Total</b>	<b>7209</b>	<b>100%</b>

*Tabla 13 Asignación de parque vehicular en la zona de estudio  
Fuente: Elaboración propia con datos de la Secretaría de Salud 2017.*

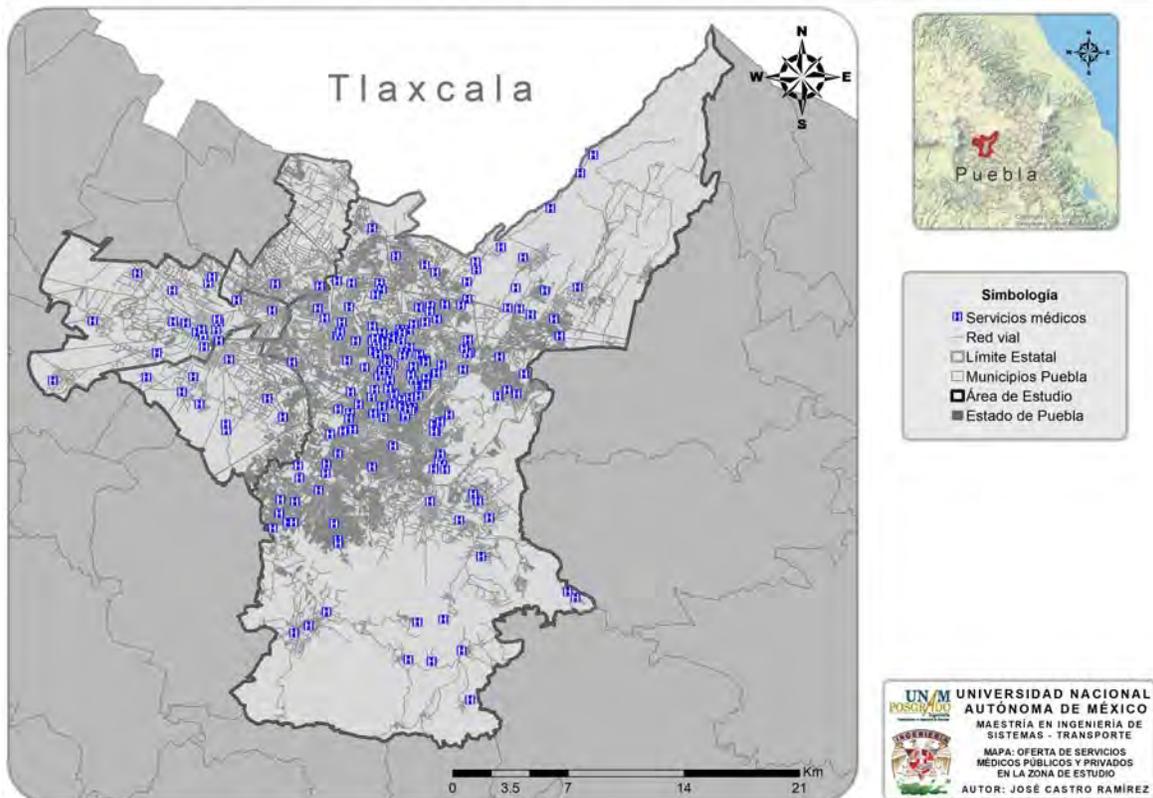
La representación gráfica de la asignación propuesta del parque vehicular de ambulancias administradas por la SSEP se muestra en Mapa 15.



Mapa 15 Asignación de ambulancias en la zona de estudio  
Fuente: Elaboración propia

Para obtener la oferta de instalaciones de servicios médicos públicos y privados en la zona de estudio; se consultó las bases de datos elaboradas por el INEGI durante el año 2015 y el portal de datos abiertos elaborado por el gobierno federal del país. Con dicha consulta se obtuvo que el número de instalaciones médicas públicas y privadas fue de 253, la ubicación espacial de dichas instalaciones se muestra en el Mapa 16.

OFERTA DE SERVICIOS MÉDICOS PÚBLICOS Y PRIVADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO



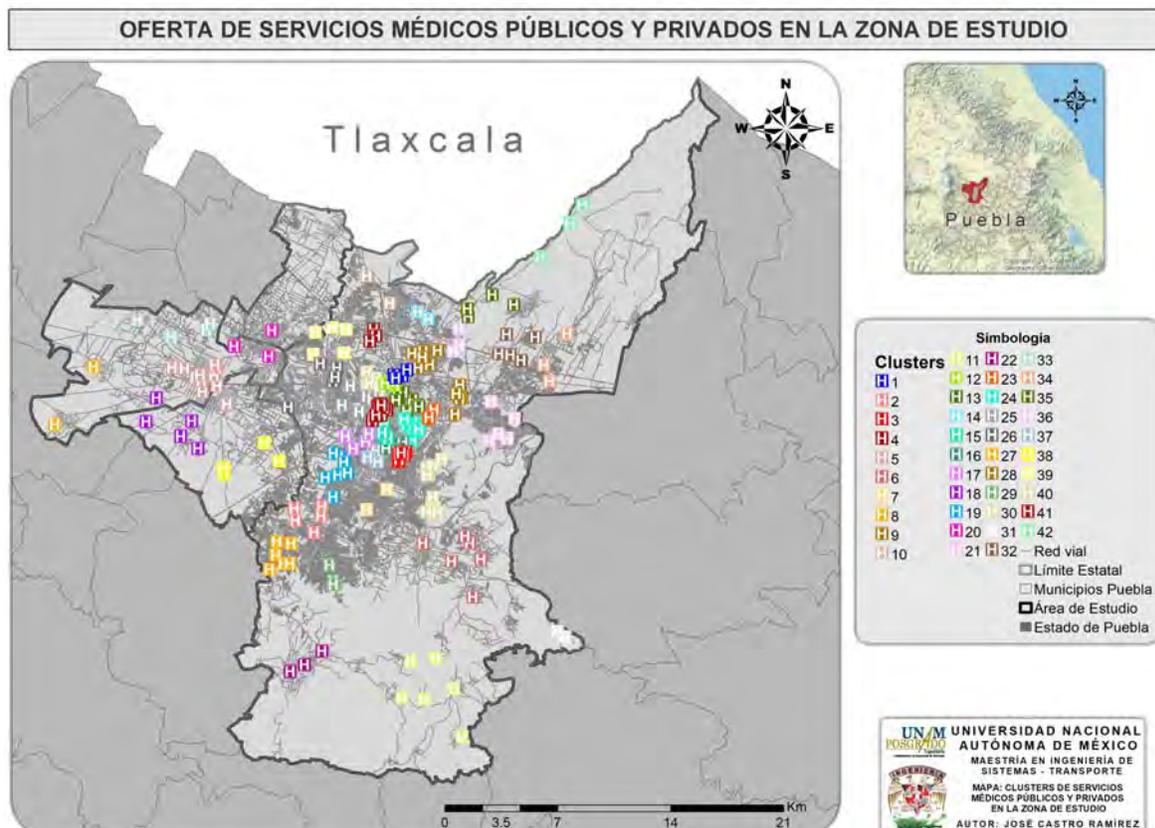
Mapa 16 Oferta de servicios médicos públicos y privados en la zona de estudio  
Fuente: Elaboración propia

Información proporcionada por la SSEP exhibe que actualmente las ambulancias administradas por SUMA no cuentan con sitios fijos (bases) para su permanencia en espera de la solicitud de servicio, es decir, las ambulancias permanecen en constante movimiento dentro de las vialidades de la ZMEP durante su jornada laboral, lo cual incrementa los gastos de operación asociados a sus ambulancias. Para realizar la elección de las instalaciones médicas consideradas como candidatas para que los servicios de AMP permanezcan en espera de alguna solicitud de servicio; se realizó la siguiente metodología:

1. Con el objetivo de reducir alguna inclinación (subjetividad) con respecto a la elección de las instalaciones médicas en función de la ubicación espacial de las mismas se utilizó el algoritmo P-Mediana, con éste, se obtuvieron 42 clústers (Mapa 17); cada uno de ellos formado por un grupo de instalaciones

médicas distribuidas equitativamente respecto a su ubicación geográfica dentro de la zona de estudio.

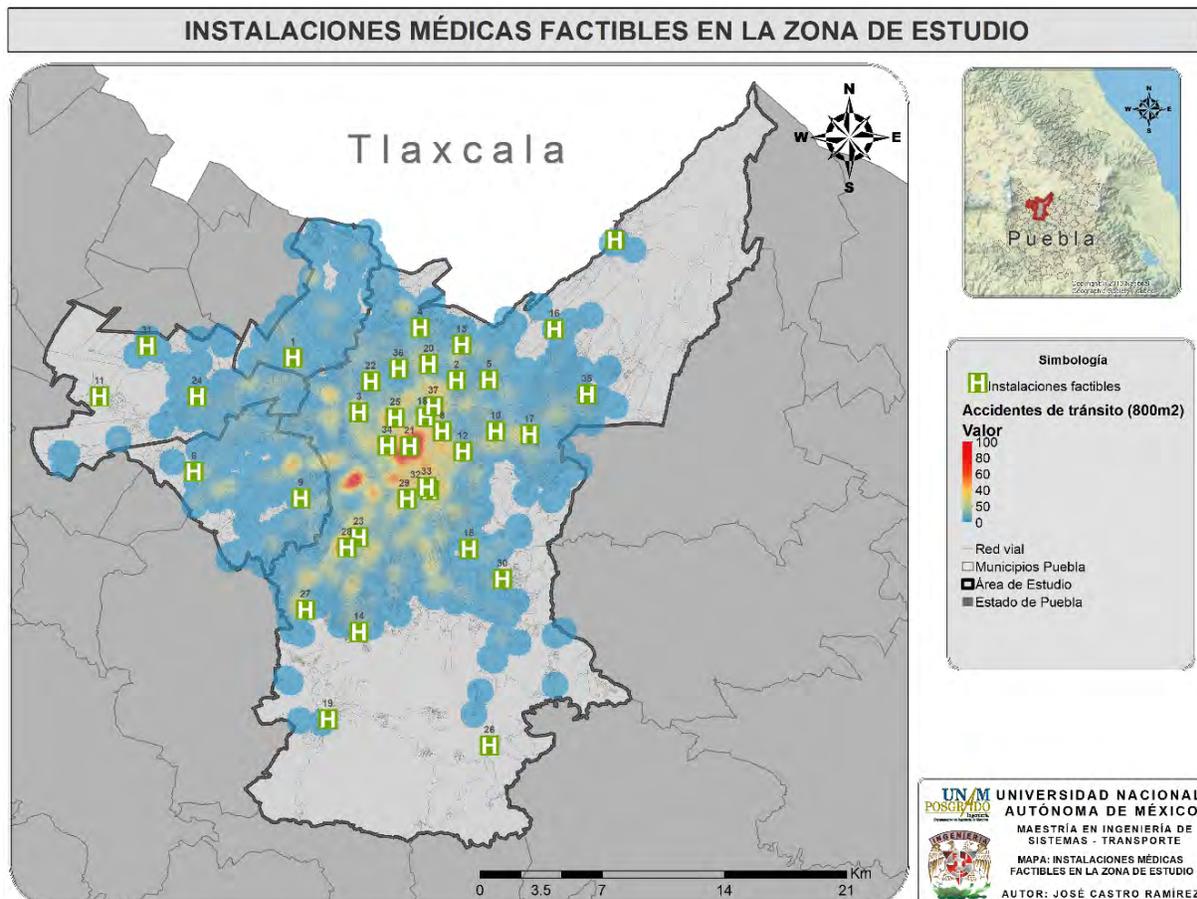
2. Para que una instalación médica sea considerada como candidata debe cumplir con los siguientes requerimientos:
  - a. Ser administrada por cualquier dependencia de gobierno del Estado
  - b. Contar con espacio de estacionamiento disponible para la permanencia de un vehículo de AMP al interior de la instalación
  - c. Estar ubicado en vialidades principales o cerca de alguna vialidad secundaria
  - d. En medida de lo posible, estar dentro de las zonas de mayor frecuencia de accidentes mostradas en el Mapa 7.



Mapa 17 Clusters de instalaciones médicas en la zona de estudio  
Fuente: Elaboración propia

Al implementar la metodología anterior para la selección de instalaciones factibles se obtuvieron 37 instalaciones que cumplieran con al menos 3 de las 4 restricciones para considerarse como candidatas para el emplazamiento de vehículos de AMP.

La ubicación espacial de cada una de las instalaciones factibles se muestra en el Mapa 18, en el cual se añadió el mapa de calor de los siniestros viales registrados por el RAVMex con la finalidad de contrastar las posibles ubicaciones de ambulancias con la intensidad de siniestros vehiculares registrados en la zona de estudio.



Mapa 18 Instalaciones médicas factibles para ubicación de ambulancias  
Fuente: Elaboración propia

La ubicación postal de las instalaciones médicas elegidas como factibles mostradas en el mapa anterior se muestra en la Tabla 14.



ID de instalación	Nombre	Ubicación
1	Centro de Salud San Juan Cuautlancingo	Xicoténcatl 11, San Juan Cuautlancingo, Puebla.
2	Hospital General Zona Norte de Puebla	Infonavit San Pedro, Estación Nueva, 72200 Puebla.
3	Centro de Salud Reforma Sur	Calle 55 Sur & Av 3 Pte, Reforma Sur, 72160 Puebla.
4	Centro de Salud Colonia Ignacio Mariscal	Del Charro, Benito Juárez, 72014 Puebla, Pue.
5	Centro De Salud Ignacio Mariscal	Calle Corregidora N/A, Tepeyac, 72920, Puebla.
6	Seguro Popular	Hidalgo, Sta María Tonanzintla, 72840 San Andrés Cholula.
7	Centro De Salud San Miguel Canoa	Calle Lupita 12, Séptima, 72900 Puebla.
8	IMSS HE CMN PUEBLA	Calle 2 Nte 2004, Centro, 72000 Puebla.
9	Hospital general de Cholula	San Bernardino, Tlaxcalancingo, Puebla.
10	Centro de Salud Los Aztecas	Retorno Esgrima 4603, Unidad Magisterial México 68, 72300 Puebla.
11	San Francisco Coapa	Matamoros S/N, 72760, San Pedro Cholula.
12	ISSSTEP U.M.F. 1	Calle 24 Nte. 1206, Barrio de los Remedios, 72377 Puebla.
13	Centro De Salud San Sebastián De Aparicio	Calle Reforma s/n, San Sebastián de Aparicio, 72920 Puebla.
14	Patronato del Hospital General de Puebla	Guadalupe Hidalgo 11350, Hidalgo, 72260 Puebla.
15	Hospital Batan Puebla	Anáhuac, Lomas de San Miguel, Puebla,
16	Hospital de Especialidades Guadalupe de Izúcar	Vicente Guerrero 80, Centro, 74400 Izúcar de Matamoros, Puebla.
17	Centro De Salud Atempan	5 Sur 12, Bosques Amalucan, 73940 Atempan, Puebla.
18	IMSS	Calle 26 Pte. 1109, Santa Anita, Puebla.
19	Centro De Salud San Andrés Azumiatla	Calle Zapotitlán Col, Col Centro, Poza Rica, 59 Col Centro, San Andrés Azumiatla.
20	Hospital de Traumatología y Ortopedia "Doctor y General Rafael Moreno Valle"	El Conde, Zona Industrial Anexo a la Loma, 72014 Puebla.
21	Hospital Universitario de Puebla BUAP	Av 27 Pte 1314, Los Volcanes, 72410 Puebla.
22	Centro de Salud Urbano Francisco I. Madero	Calle Hidalgo S, Francisco I. Madero, 72130 Puebla.
23	Centro de Salud La Popular Castillola	Avenida Puebla S/N esquina Quintana Roo, Popular Castillola, 72470 Puebla.
24	Centro De Salud San Pedro Cholula	Av. Vicente Guerrero 107, San Cristóbal Tepontla, 72765 Cholula.
25	Unidad Médica de Atención Ambulatoria	Av. 10 Poniente 2701 Entre Calle 27 Norte y Calle 29 Norte, La Providencia, 72140 Puebla, Pue.
26	Centro De Salud Los Ángeles Tetela	16 De Septiembre N/A, 72000 Puebla.

Tabla 14 Instalaciones médicas factibles

Fuente: Elaboración propia



ID de instalación	Nombre	Ubicación
27	Hospital General Del Sur Puebla	Antiguo Camino Guadalupe Hidalgo 11350, Amp. Lomas de Castillota, 72490 Puebla,
28	IMSS	San Bartolo Poniente B S/N, INFONAVIT San Bartolo, 72470 Puebla.
29	ISSSTE Mante	Blvrd 14 Sur 4336, Jardines de San Manuel, 72570 Puebla.
30	Centro de Salud Santa Catarina	Diagonal Fernando Solana Gómez, Puebla.
31	Centro de Salud Unión Antorchista-Esperanza	Av. Atlixco S/N, Col. 2da Ampliación Unión Antorchista, 72490 Puebla,
32	Hospital Regional ISSSTE	San Manuel, Jardines de San Manuel, 72570 Puebla.
33	ISSSTE	Prolongación 14 Sur, San Manuel, Jardines de San Manuel, Puebla
34	DIF Estatal	Av 25 Pte 2302, Los Volcanes, 72410 Puebla.
35	Centro De Salud Atempan	Sur 12, Bosques Amalucan, 73940 Atempan, Puebla.
36	Hospital Beneficencia Española de Puebla	Calle 19 Nte. 1001, Jesús García, 72090 Puebla, Puebla.
37	Unidad Médica de Especialidades	Calle 11 Nte. 4011, Santa María, 72080 Puebla.

Tabla 12 Continuación

Fuente: Elaboración propia

### 3.6 Modelo matemático utilizado para solución de la problemática

El modelo seleccionado para la solución del problema de estudio será el Modelo Doble Estándar (DSM), detallado en la sección 2.3.6 del presente trabajo de investigación.

Para el caso de estudio se contemplaron algunas adecuaciones al algoritmo DSM, éstas responden a la necesidad de representar con mayor detalle la operación actual de los elementos involucrados en el DSM y los servicios de AMP. Dichas adecuaciones se pueden englobar en las siguientes dos categorías:

1. Factor de congestionamiento
2. Número máximo de instalaciones factibles a utilizar

Las condiciones de tránsito vehicular dentro de la red vial en la zona de estudio es de gran importancia, ya que el tiempo de viaje para llegar a un punto donde sea solicitado un servicio de AMP es inversamente proporcional a la velocidad de recorrido en los arcos de la red, para la representación del tiempo de viaje considerando las condiciones de transito se utilizará el siguiente factor de



congestionamiento, el cual ha sido utilizado por diversos autores en el campo de investigación de tiempos de recorrido considerando congestionamiento :

$$C_i = \frac{t_{vi}}{t_{vffsi}}$$

Dónde:  $C_i$  representa el factor de congestionamiento,  $t_{vi}$  corresponde al tiempo de viaje del sitio origen en donde se ubica la ambulancia de AMP al destino  $i$  donde es solicitado el servicio, para ello se utilizarán las velocidades de recorrido obtenidas en el estudio de velocidades de la zona de estudio, y finalmente  $t_{vffsi}$  corresponde al tiempo de viaje del sitio origen en donde se ubica la ambulancia de AMP al destino  $i$  donde es solicitado el servicio bajo las velocidades máximas permitidas (reglamento de tránsito del Estado de Puebla).

Por otra parte, las restricciones relacionadas con el número máximo de ambulancias que se pueden emplazar (asociadas al número de instalaciones factibles) se representan como sigue:

$$v_j \in \{0,1\} \quad (j \in W)$$

$$\sum_{j \in W_{i1}} v_j \leq q \quad i \in V$$

Dónde:  $q$  representa el número máximo de instalaciones que pueden ser utilizadas por las ambulancias.

Finalmente, el modelo matemático que se utilizó para la solución del problema analizado es el siguiente:

$$\max \sum_{i \in V} d_i y_{i2} - C_i \quad (26)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in W_{i2}} x_j \geq 1, \quad i \in V \quad (13)$$

$$\sum_{i \in V} d_i y_{i1} \geq \alpha \sum_{i \in V} d_i \quad (14)$$



$$y_{i2} \geq y_{i1}, \quad i \in V \quad (15)$$

$$\sum_{j \in W_{i1}} x_j \geq y_{i2} + y_{i1}, \quad i \in V \quad (16)$$

$$\sum_{j \in W} x_j = p \quad (17)$$

$$x_j \leq p_j, \quad j \in W \quad (18)$$

$$v_j \in \{0,1\} \quad (j \in W) \quad (27)$$

$$\sum_{j \in W_{i1}} v_j \leq q \quad i \in V \quad (28)$$

$$y_{i2}, y_{i1} \in \{0, 1\}, \quad i \in W \quad (19)$$

$$x_j \text{ entero}, \quad j \in W \quad (20)$$



## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

El algoritmo propuesto fue resuelto con el software GAMS (General Algebraic Modeling System), el cual es un lenguaje de programación que permite el modelado, análisis y resolución de diversos problemas de optimización. Una de las principales bondades de GAMS es que la sintaxis utilizada en el software de un problema de optimización coincide con la descripción matemática de ese problema, además de incluir CPLEX el mejor optimizador para problemas MIP (Mixed Integer Programs).

```
G:\tesis\jose\03082017.gms
03082017.gms
SET i renglon label /il*i37/
* ubicacion origen
j columna label /Cl*C4677/
* destino de servicio
Scalar
*radio de cobertura 1
r1 "radio 1" /840/
*radio de cobertura 2
r2 "radio 2" /1450/
*total de ambulancias disponible
q "total de ambulancias" /17/
*proporcion de servicios minimos a cubrir
a "alpha" /.95/;

Parameter
*#max de ambulancias por instalacion
p(i)
/
$CALL =xls2gms r=a1:b37 i=C:\Users\7\Documents\José\pmax.xlsx o=pmax.inc
$INCLUDE pmax.inc
/

*demanda de servicios
d(j)
/
$CALL =xls2gms r=a1:b4677 i=C:\Users\7\Documents\José\demanda.xlsx o=demanda.inc
$INCLUDE demanda.inc
/
;
```

Figura 15 Codificación en GAMS del algoritmo propuesto

Fuente: Elaboración propia

El análisis del caso de estudio se realizó en dos periodos diferentes a lo largo del día (horario pico y horario valle); esto debido a que el comportamiento del tránsito vehicular a lo largo del día es diferente y, en consecuencia; las velocidades de operación en las diferentes vialidades en la zona de estudio son diferentes.

Por otra parte, para la visualización grafica de las coberturas alcanzadas por las ambulancias con el emplazamiento propuesto se utilizarán áreas de influencia o de

servicio, las cuales son comunes de obtener con un SIG, dichas áreas, corresponden a las áreas de influencia de un sitio seleccionado, un área de servicio de red es una región que abarca todas las calles accesibles de la red vial diseñada dentro de una medida de impedancia especificada; generalmente en unidades de tiempo. Las áreas de servicio comúnmente se utilizan para visualizar y medir la accesibilidad.

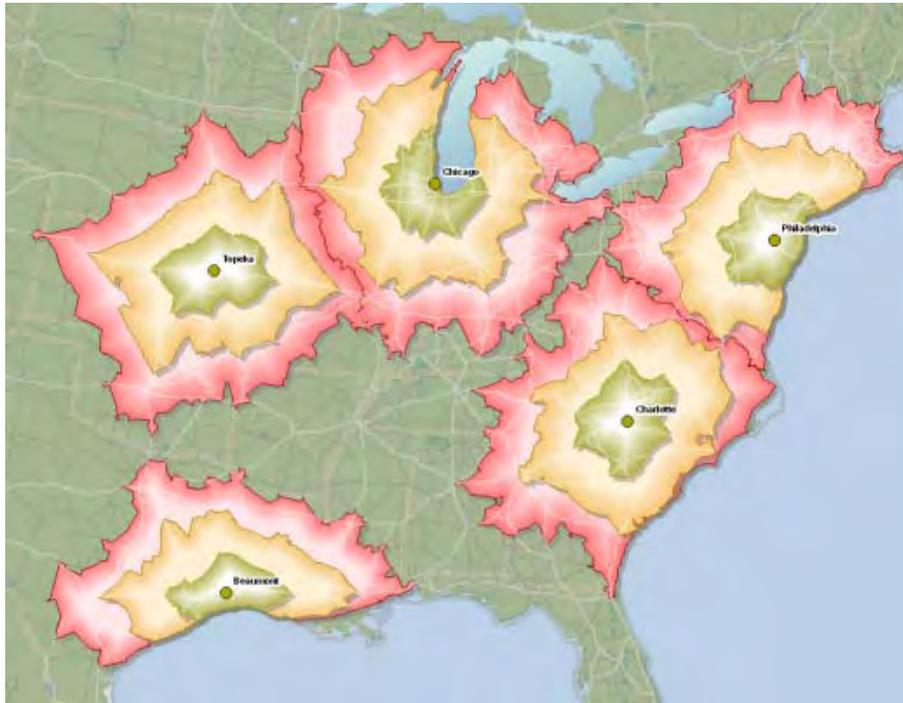


Figura 16 Ejemplo de áreas de servicio  
Fuente: Elaboración propia

#### 4.1 Horario Valle

En éste periodo se tienen las mejores condiciones de tránsito vehicular en la zona de estudio. En la Tabla 15 se muestran los resultados obtenidos con la ejecución de la codificación en GAMS, la primera columna se refiere al radio de cobertura que se obtendría con la distribución propuesta de los vehículos utilizados en el caso de estudio, la segunda columna representa el porcentaje de servicios que quedarían sin cubrir dentro del radio de cobertura analizado, las columnas 3-14 representan la proporción de viajes cubiertos por un determinado número de vehículos: por ejemplo, la columna 7 indica el porcentaje de servicios que pueden ser cubiertos por 5 vehículos; es decir, un mismo servicio puede ser atendido por 5 vehículos



dentro del radio de cobertura analizado, finalmente la columna 15 indica el porcentaje total de servicios cubiertos correspondientes al radio de cobertura analizado.

Radio de cobertura (r1) [minutos] (1)	Servicios sin cubrir (2)	Servicios cubiertos con 1 vehículo (3)	Servicios cubiertos por 2 vehículos (4)	Servicios cubiertos por 3 vehículos (5)	Servicios cubiertos por 4 vehículos (6)	Servicios cubiertos por 5 vehículos (7)	Servicios cubiertos por 6 vehículos (8)	Servicios cubiertos por 7 vehículos (9)
5	6%	43%	41%	9%	0%	0%	0%	0%
6	3%	35%	47%	15%	0%	0%	0%	0%
7	1%	34%	48%	15%	2%	0%	0%	0%
8	1%	16%	39%	41%	4%	0%	0%	0%
9	1%	2%	24%	34%	34%	6%	0%	0%
10	1%	2%	16%	22%	22%	32%	5%	1%
11	0%	0%	7%	27%	35%	28%	2%	0%
12	0%	0%	6%	5%	6%	16%	24%	28%
13	0%	0%	3%	3%	6%	11%	14%	30%
14	0%	0%	2%	3%	2%	6%	5%	9%

Tabla 15 Cobertura de servicios en horario valle

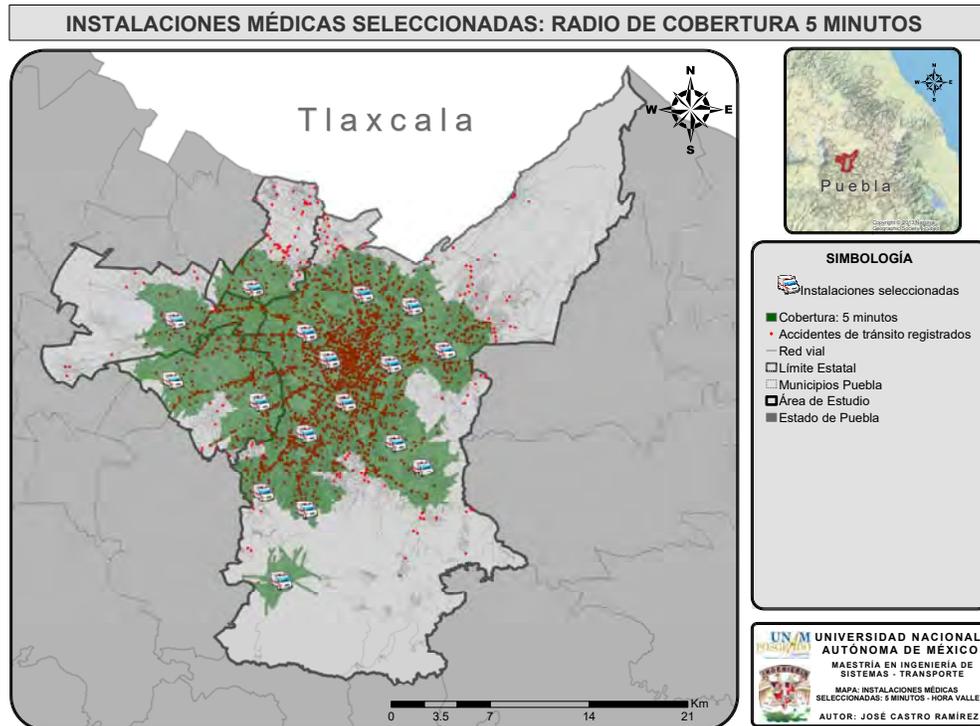
Fuente: Elaboración propia

Radio de cobertura (r1) [minutos]	Servicios cubiertos por 8 vehículos (10)	Servicios cubiertos por 9 vehículos (11)	Servicios cubiertos por 10 vehículos (12)	Servicios cubiertos por 11 vehículos (13)	Servicios cubiertos por 12 vehículos (14)	Cobertura total (15)
5	0%	0%	0%	0%	0%	93.71%
6	0%	0%	0%	0%	0%	97.22%
7	0%	0%	0%	0%	0%	98.72%
8	0%	0%	0%	0%	0%	98.89%
9	0%	0%	0%	0%	0%	98.93%
10	0%	0%	0%	0%	0%	99.40%
11	0%	0%	0%	0%	0%	99.51%
12	14%	1%	0%	0%	0%	99.62%
13	19%	12%	0%	0%	0%	99.81%
14	18%	33%	18%	3%	0%	99.94%

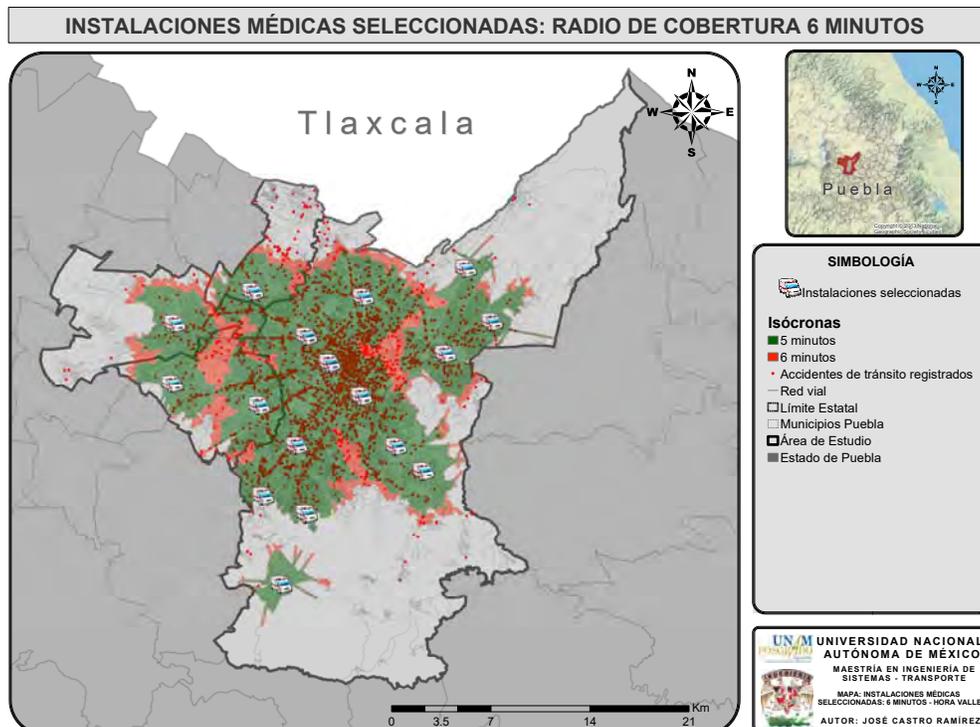
Tabla 9 Continuación

Fuente: Elaboración propia

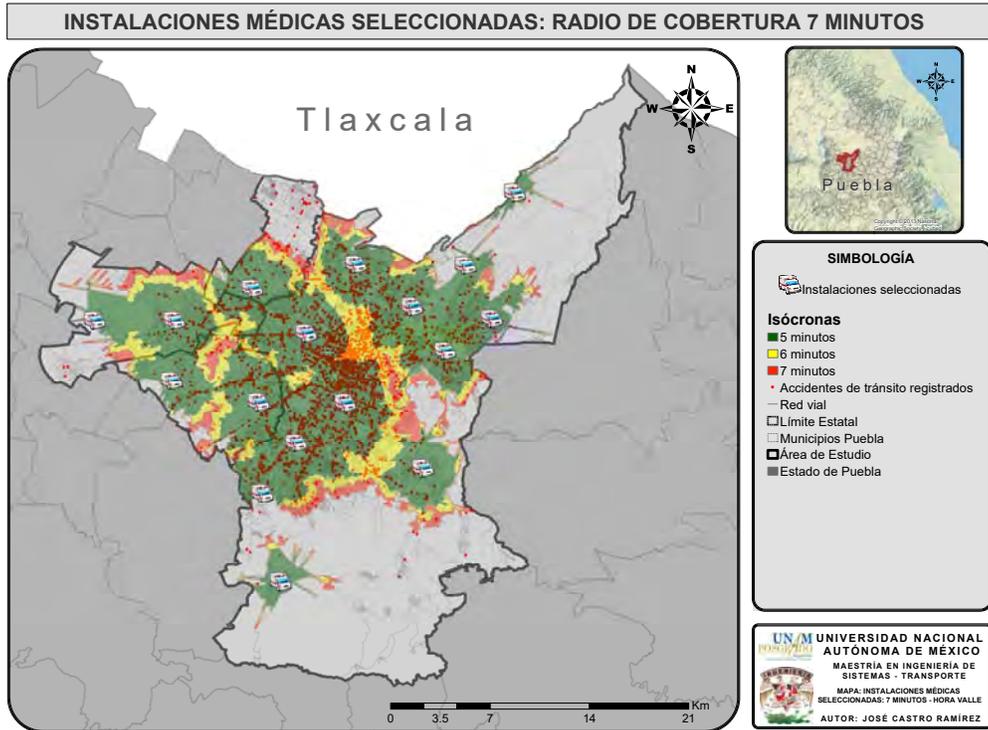
El detalle de la representación gráfica y espacial de los resultados para cada uno de los escenarios analizados se muestran en los Mapa 19-Mapa 28.



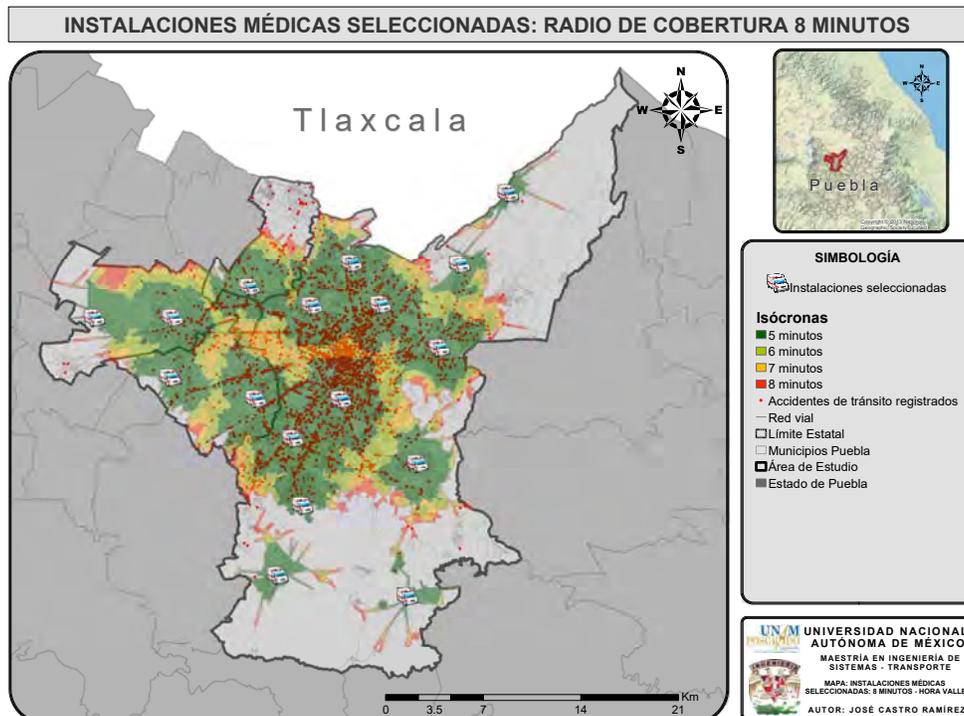
Mapa 19 Cobertura: 5 minutos en hora valle  
 Fuente: Elaboración propia



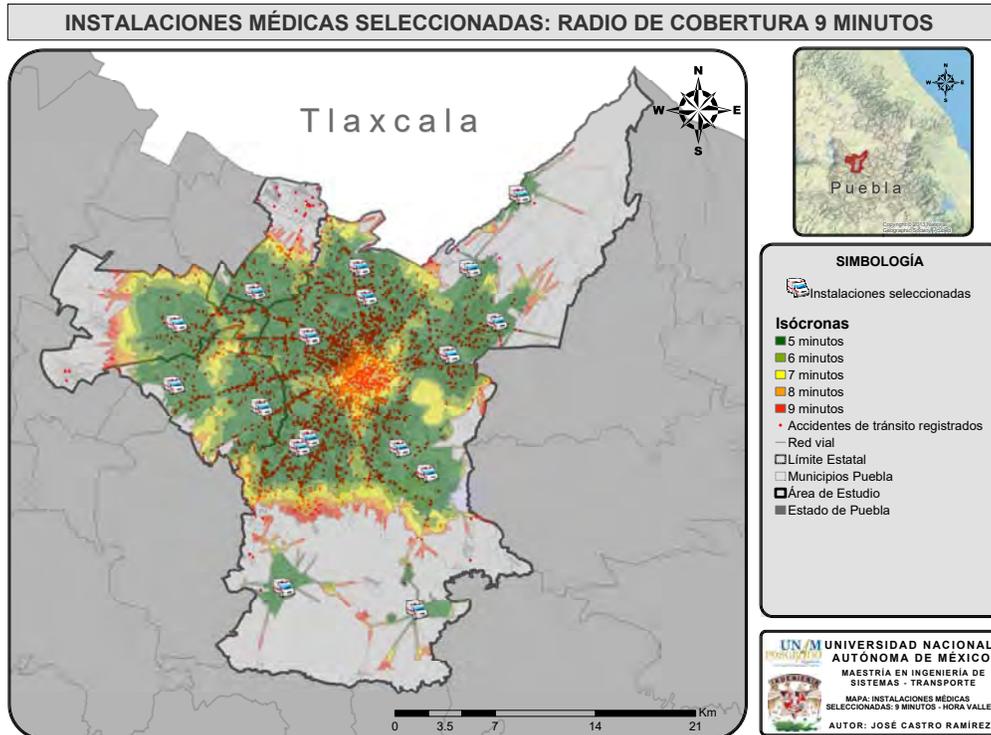
Mapa 20 Cobertura: 6 minutos en hora valle  
 Fuente: Elaboración propia



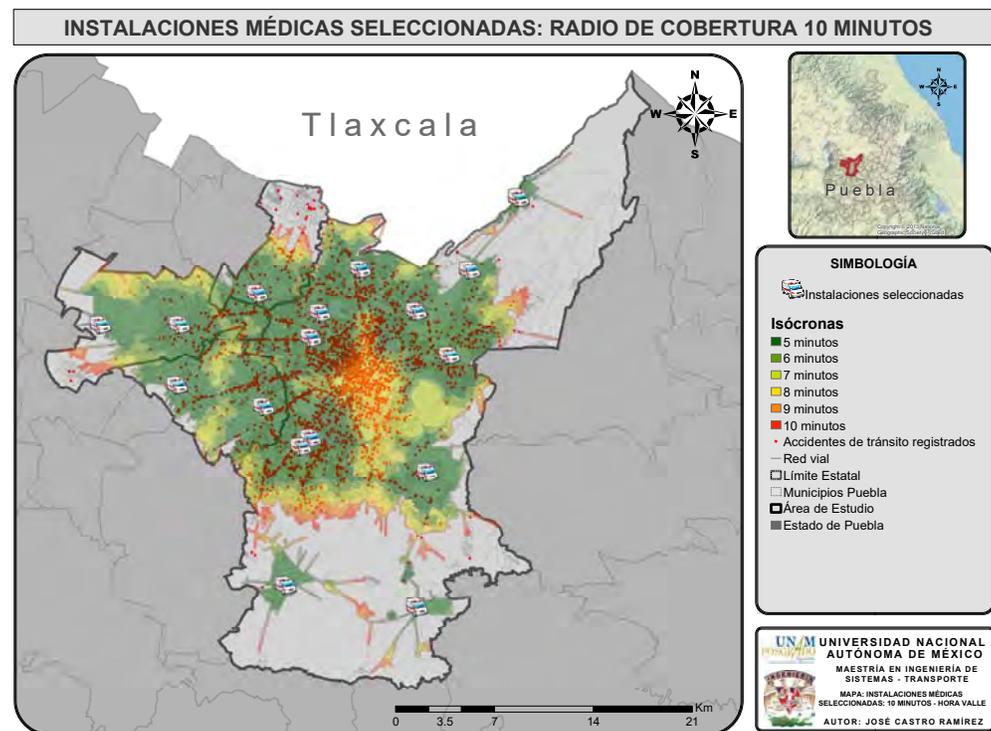
*Mapa 21 Cobertura: 7 minutos en hora valle*  
*Fuente: Elaboración propia*



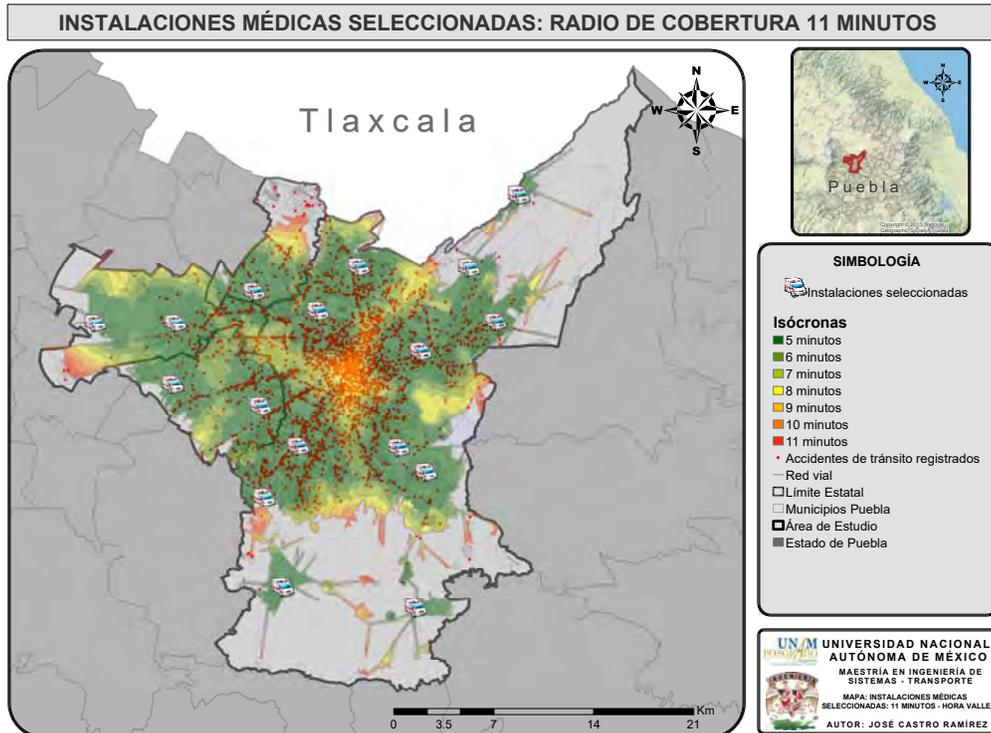
*Mapa 22 Cobertura: 8 minutos en hora valle*  
*Fuente: Elaboración propia*



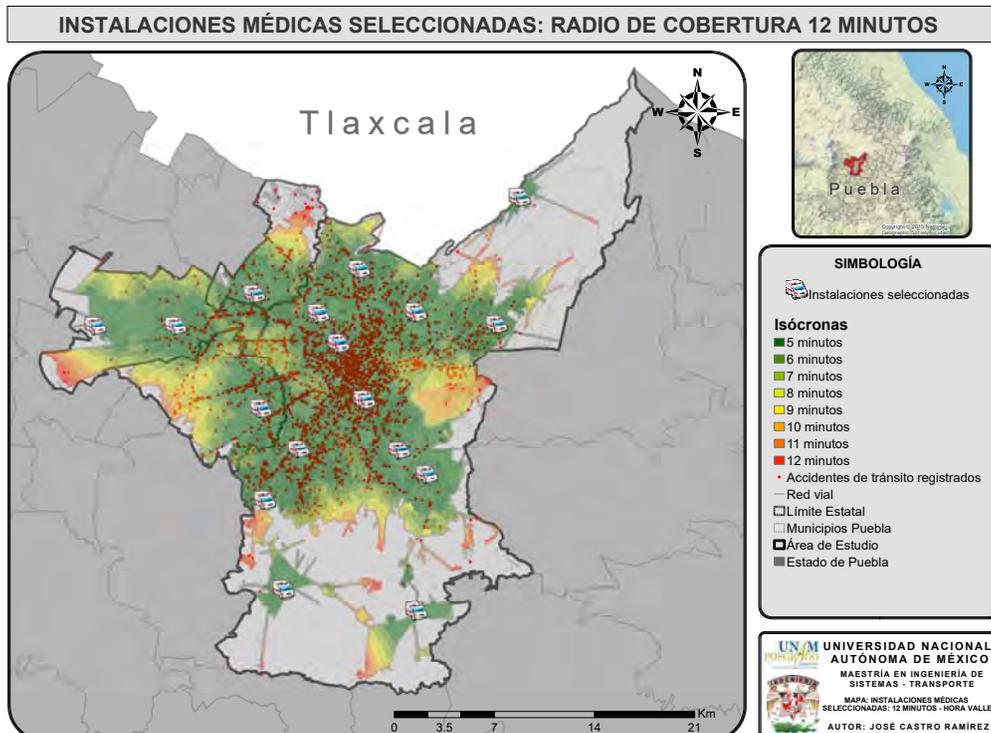
Mapa 23 Cobertura: 9 minutos en hora valle  
 Fuente: Elaboración propia



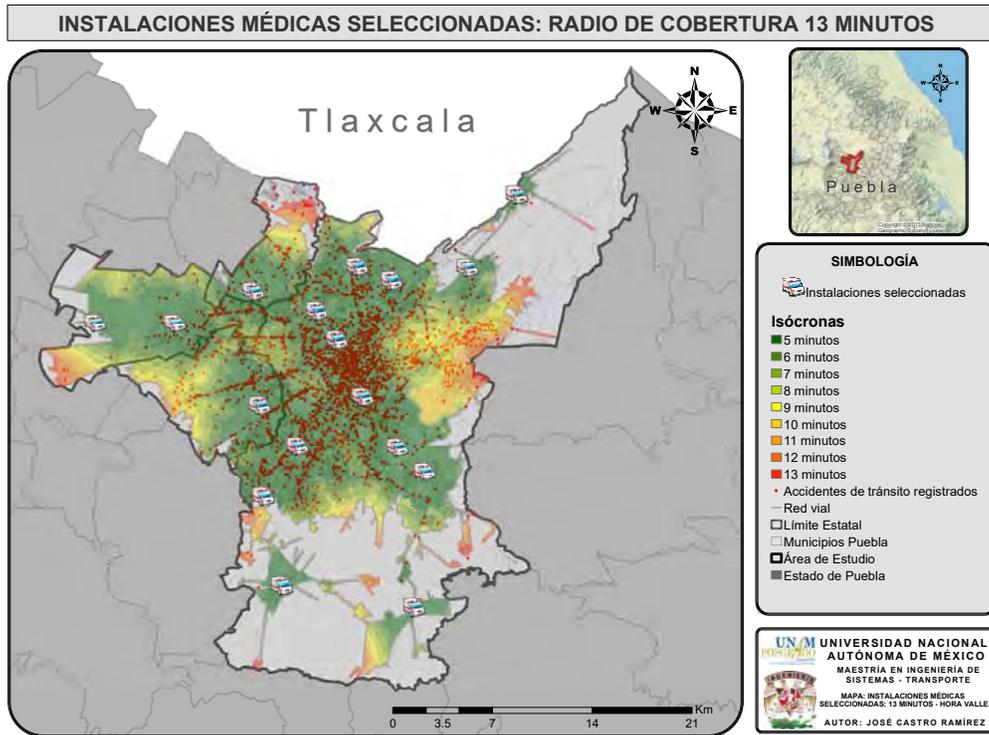
Mapa 24 Cobertura: 10 minutos en hora valle  
 Fuente: Elaboración propia



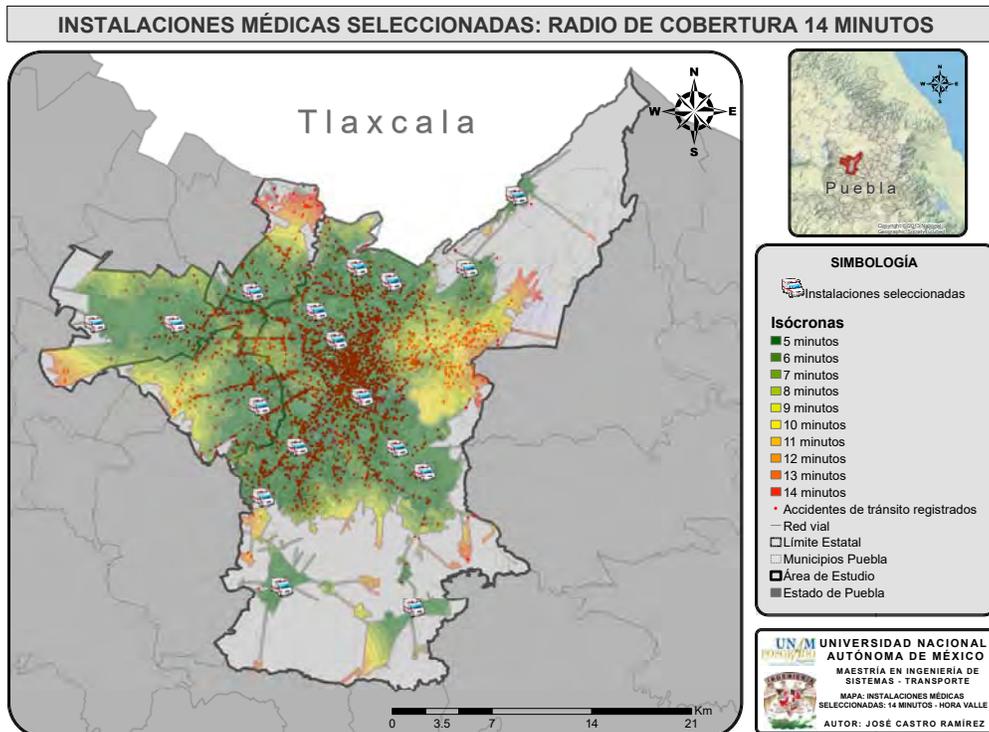
Mapa 25 Cobertura: 11 minutos en hora valle  
 Fuente: Elaboración propia



Mapa 26 Cobertura: 12 minutos en hora valle  
 Fuente: Elaboración propia



Mapa 27 Cobertura: 13 minutos en hora valle  
 Fuente: Elaboración propia



Mapa 28 Cobertura: 14 minutos en hora valle  
 Fuente: Elaboración propia



Las instalaciones seleccionadas para cada isócrona de cobertura en la Tabla 16, para complementar dicha información se sugiere consultar la Tabla 14 y así conocer la ubicación exacta de las instalaciones seleccionadas en función del ID de la instalación.

Isócrona	ID de instalaciones seleccionadas
5 minutos	1, 3, 5, 6, 9, 12, 14, 15, 17, 19, 20, 23, 24, 27, 29, 30, 34
6 minutos	1, 3, 6, 9, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 24, 27, 28, 30, 33, 34, 35
7 minutos	1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 16, 17, 19, 24, 27, 28, 29, 30, 35
8 minutos	1, 2, 4, 6, 7, 9, 11, 14, 16, 17, 19, 22, 24, 26, 28, 29, 30
9 minutos	1, 3, 4, 6, 7, 9, 15, 16, 17, 19, 20, 23, 24, 26, 28, 30, 35
10 minutos	1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 16, 17, 19, 22, 23, 24, 26, 28, 30
11 minutos	1, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 15, 16, 19, 22, 24, 26, 27, 28, 30, 35
12 minutos	1, 4, 5, 7, 9, 11, 15, 19, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 33, 35
13 minutos	1, 4, 7, 9, 11, 13, 15, 16, 19, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 33
14 minutos	1, 4, 7, 9, 11, 13, 15, 16, 19, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 33

Tabla 16 Instalaciones seleccionadas por isócrona en horario valle

Fuente: Elaboración propia

En resumen, los resultados para el escenario valle son:

- Con el emplazamiento de ambulancias en los sitios propuestos; más del 93% de los servicios solicitados en el periodo de estudio podrían ser cubiertos en un periodo de cinco minutos, de los cuales el 84% de los servicios pueden ser atendido por dos ambulancias dentro del mismo periodo
- Con las ubicaciones propuestas para un radio de cobertura de seis minutos; el 82% de los servicios pueden ser atendidos por dos ambulancias y un 15% más de servicios pueden ser atendidos por la tercera ambulancia dentro del mismo intervalo. Con dicha distribución se logra una cobertura del 97.22% de los servicios registrados en el periodo de estudio, lo que representa un incremento del 3.51% en la cobertura con respecto al numeral anterior.
- La cobertura obtenida con la distribución de ambulancias propuesta para un intervalo de nueve minutos es del 98.93% de servicios considerados para el análisis, de los cuales el 94% de los servicios pueden ser atendidos por hasta



cuatro ambulancias dentro del mismo intervalo, y un 6% más de servicios pueden ser atendidos por cinco ambulancias.

- Dentro de los 10 minutos de platino, solo el 1% de los servicios realizados en el periodo de estudio no podrían ser atendidos, de los cuales el 98% de los servicios pueden ser atendidos por hasta seis ambulancias dentro del mismo intervalo, y un 1% más de servicios pueden ser atendidos por siete ambulancias.
- Con la distribución propuesta y considerando un buffer de cobertura 11 minutos; menos del 0.5% de los servicios no son cubiertos en dicho intervalo, uno de los beneficios obtenidos es que cualquier servicio que se pueda solicitar podría ser atendido por al menos dos ambulancias dentro de los 11 minutos establecidos.

#### 4.1 Horario Pico

Durante el periodo pico, en la zona de estudio se presentan las condiciones más pesimistas en cuestión de tránsito vehicular, los resultados obtenidos con la ejecución de la codificación en GAMS del algoritmo propuesto se exhiben en la Tabla 17, la primera columna se refiere al radio de cobertura que se obtendría con la distribución propuesta de los vehículos utilizados en el caso de estudio, la segunda columna representa el porcentaje de servicios que quedarían sin cubrir dentro del radio de cobertura analizado, las columnas 3-8 representan la proporción de viajes cubiertos por un determinado número de vehículos: por ejemplo, la columna siete indica el porcentaje de servicios que pueden ser cubiertos por cinco vehículos; es decir, un mismo servicio puede ser atendido por cinco vehículos dentro del radio de cobertura analizado, finalmente la columna nueve indica el porcentaje total de servicios cubiertos correspondientes al radio de cobertura analizado.

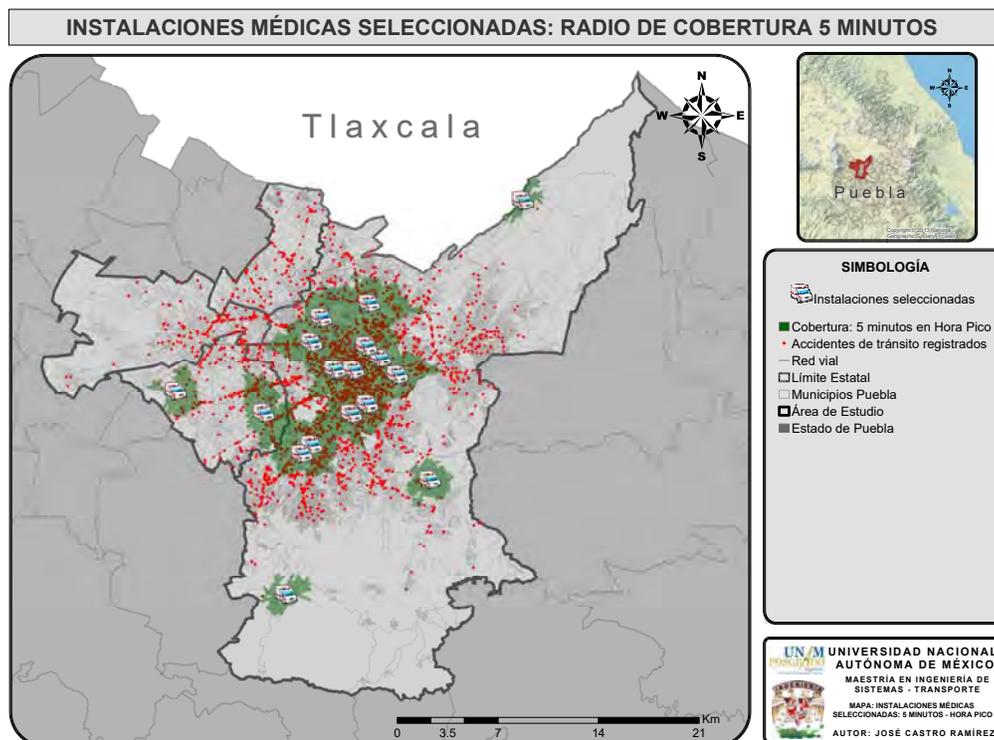


Radio de cobertura (r1) [minutos] (1)	Servicios sin cubrir (2)	Servicios cubiertos con 1 vehículos (3)	Servicios cubiertos por 2 vehículos (4)	Servicios cubiertos por 3 vehículos (5)	Servicios cubiertos por 4 vehículos (6)	Servicios cubiertos por 5 vehículos (7)	Servicios cubiertos por 6 vehículos (8)	Cobertura total (9)
5	39%	28%	27%	5%	1%	0%	0%	61.19%
6	23%	47%	26%	4%	0%	0%	0%	77.46%
7	13%	53%	31%	3%	0%	0%	0%	87.28%
8	6%	48%	36%	10%	0%	0%	0%	93.86%
9	4%	39%	41%	15%	1%	0%	0%	96.30%
10	3%	20%	39%	29%	8%	0%	0%	97.31%
11	2%	24%	51%	20%	4%	0%	0%	98.33%
12	1%	16%	44%	31%	8%	0%	0%	98.67%
13	1%	9%	32%	33%	22%	3%	0%	98.87%
14	1%	3%	21%	39%	27%	8%	1%	98.87%

Tabla 17 Cobertura de servicios en horario pico

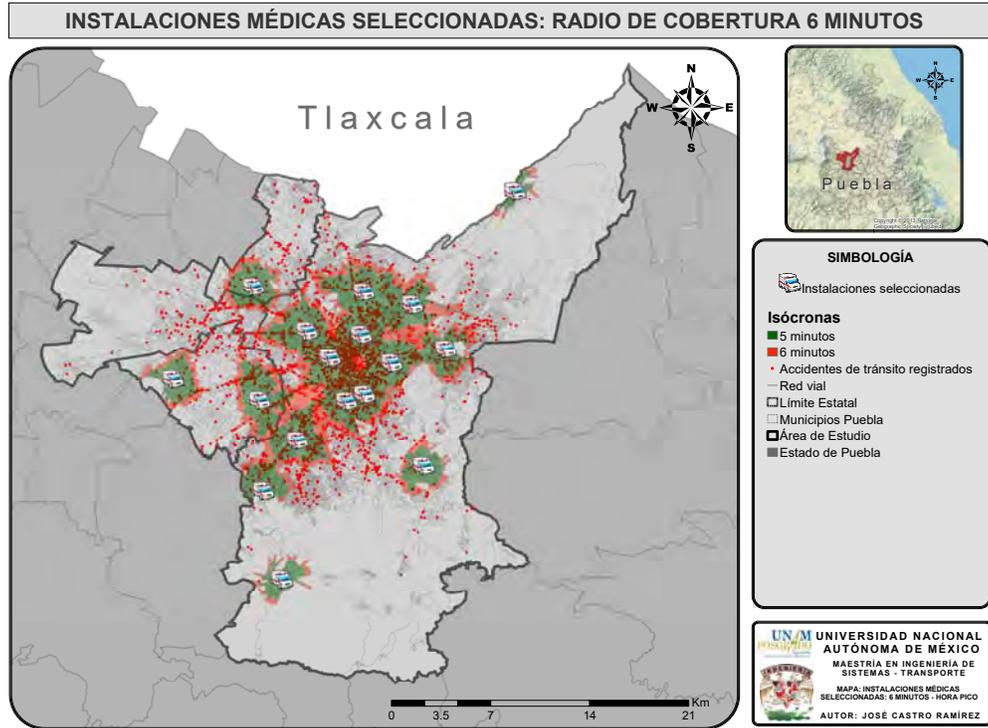
Fuente: Elaboración propia

El detalle de la representación gráfica y espacial de los resultados para cada uno de los escenarios analizados se muestran en los Mapa 29-Mapa 38.

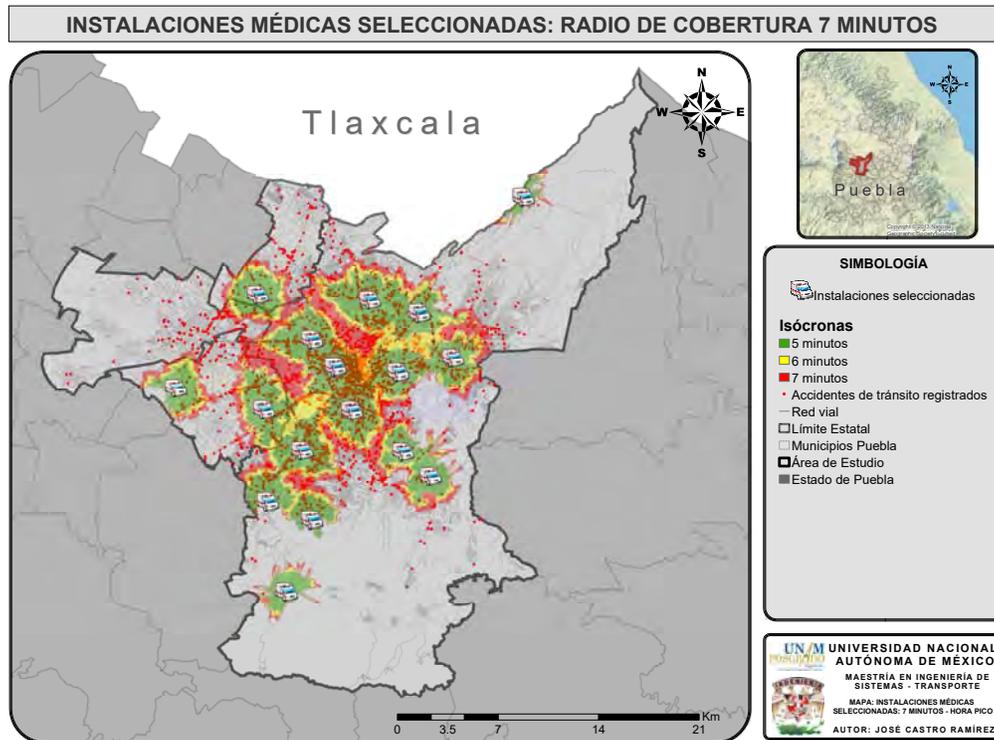


Mapa 29 Cobertura: 5 minutos en hora pico

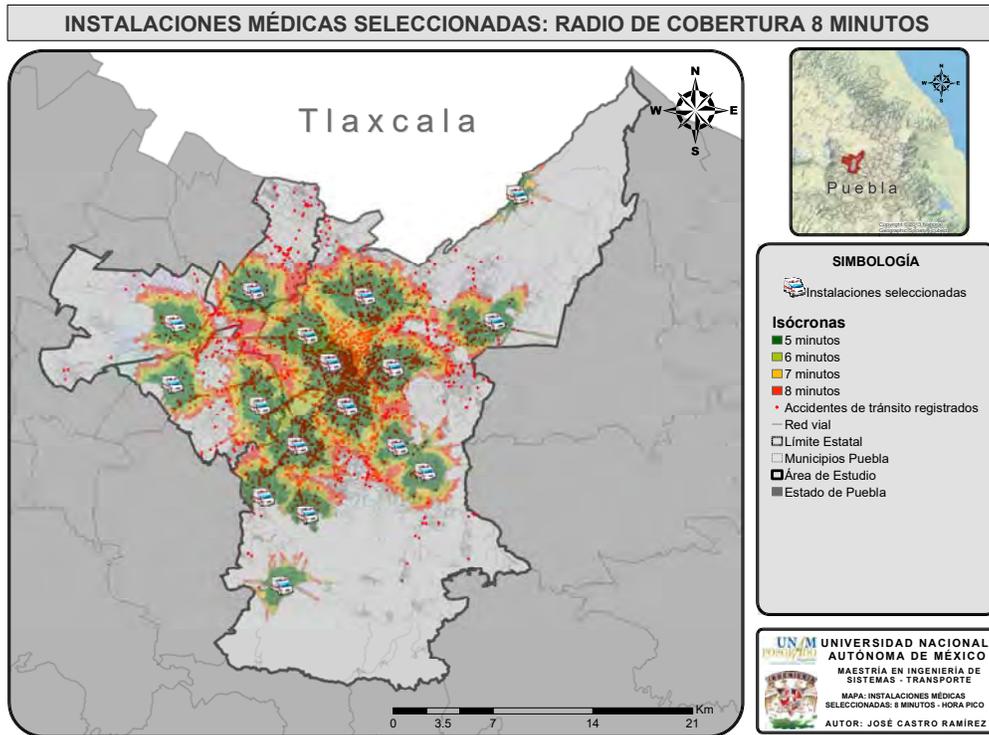
Fuente: Elaboración propia



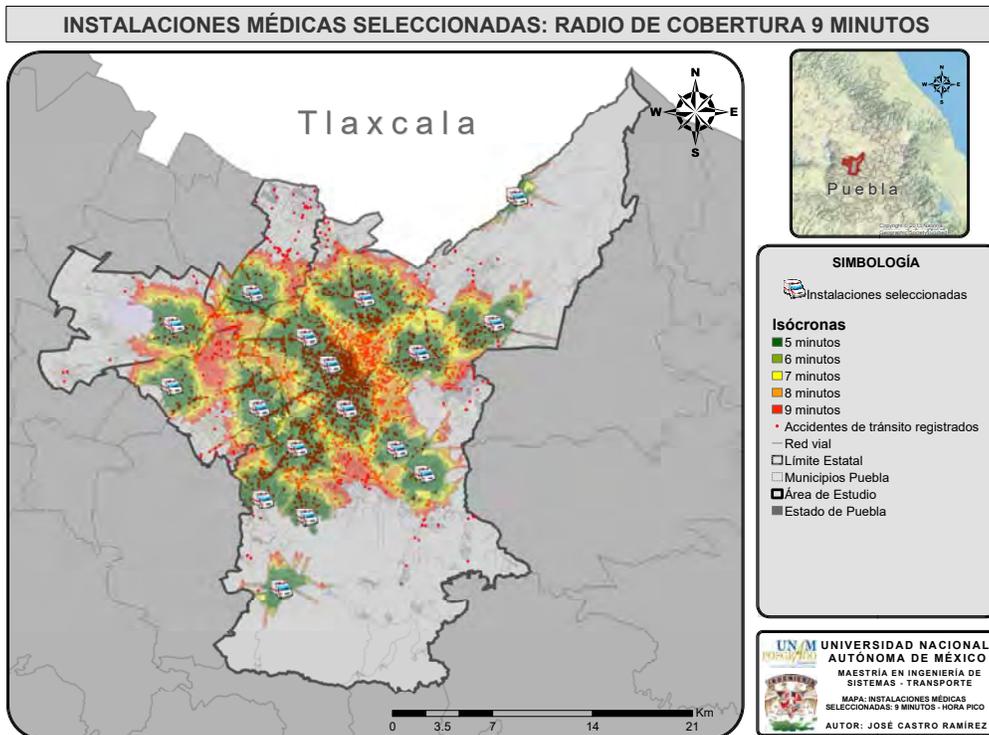
Mapa 30 Cobertura: 6 minutos en hora pico  
 Fuente: Elaboración propia



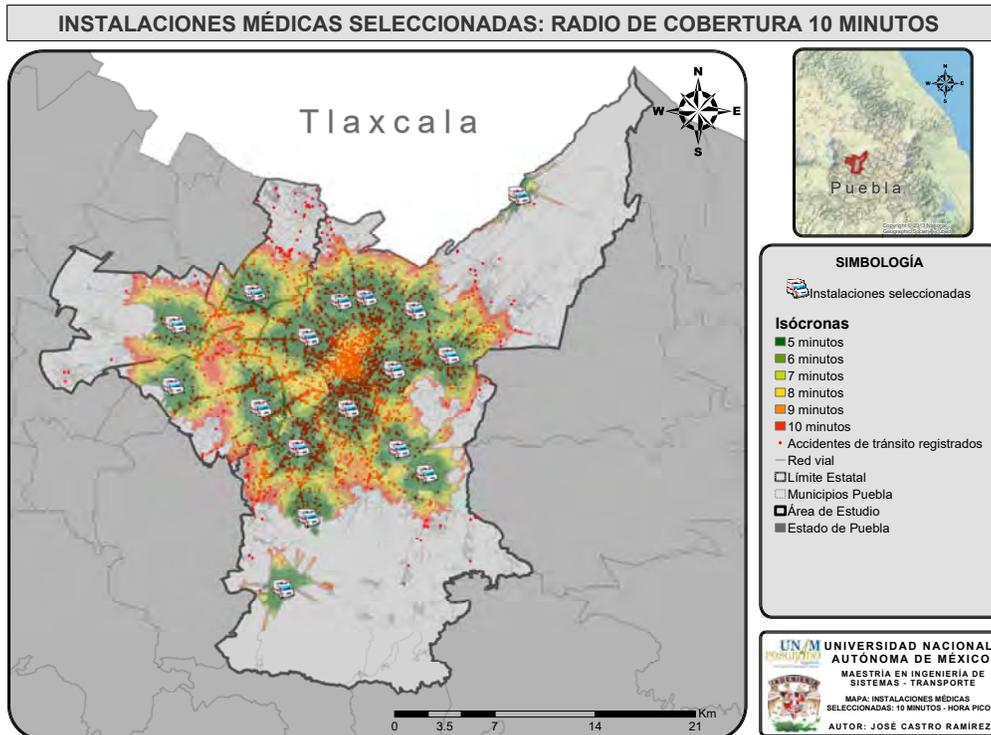
Mapa 31 Cobertura: 7 minutos en hora pico  
 Fuente: Elaboración propia



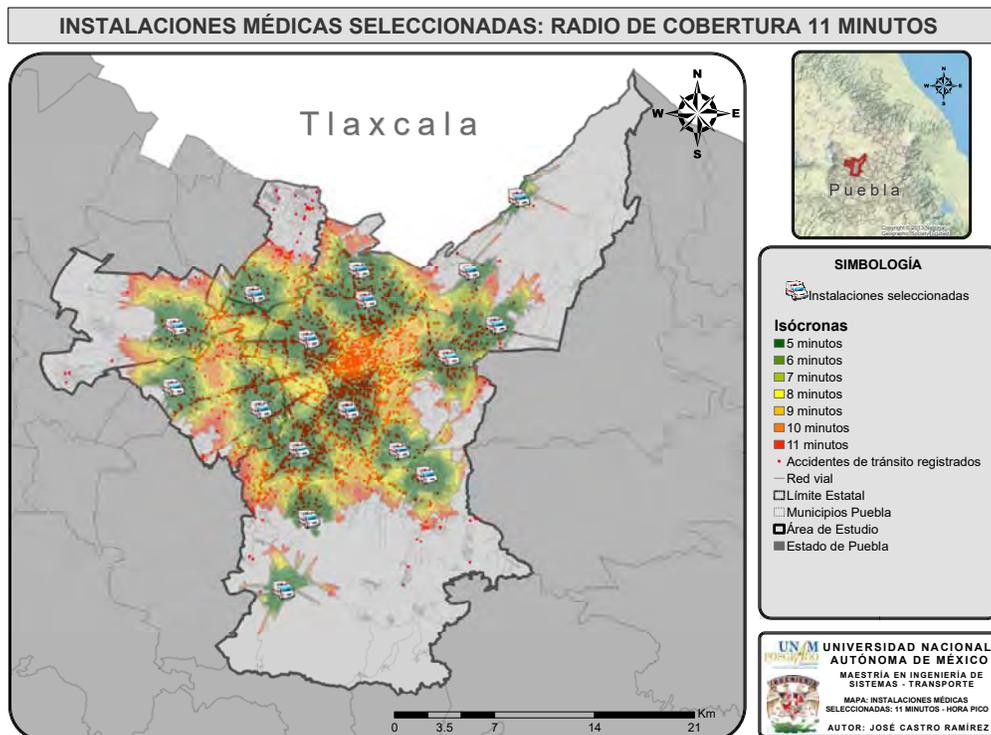
Mapa 32 Cobertura: 8 minutos en hora pico  
 Fuente: Elaboración propia



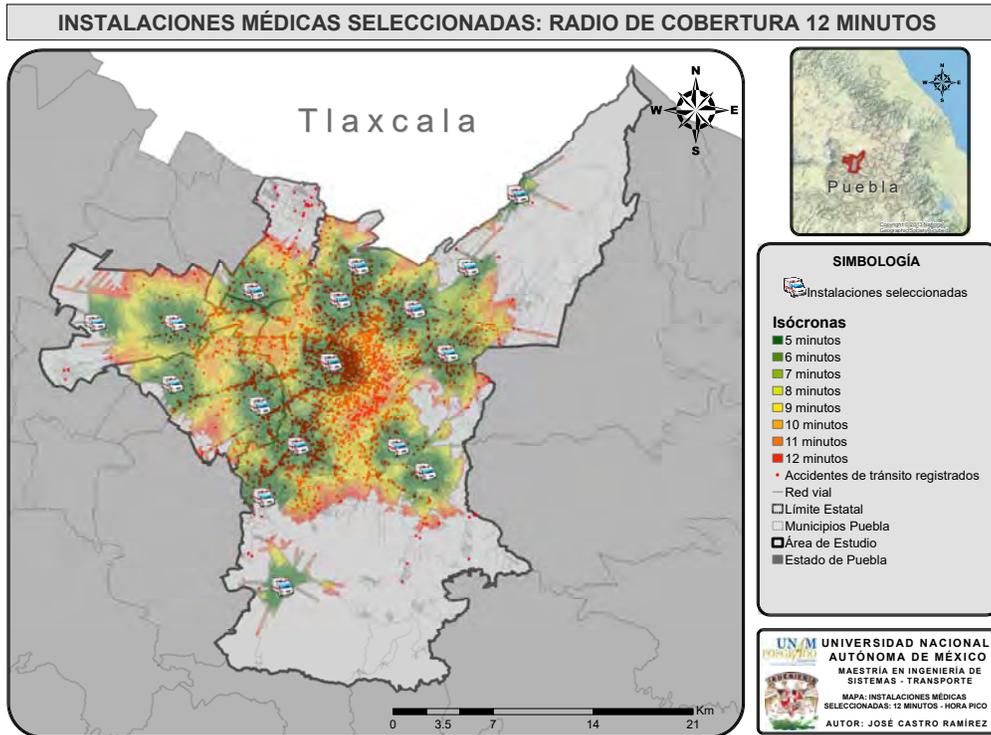
Mapa 33 Cobertura: 9 minutos en hora pico  
 Fuente: Elaboración propia



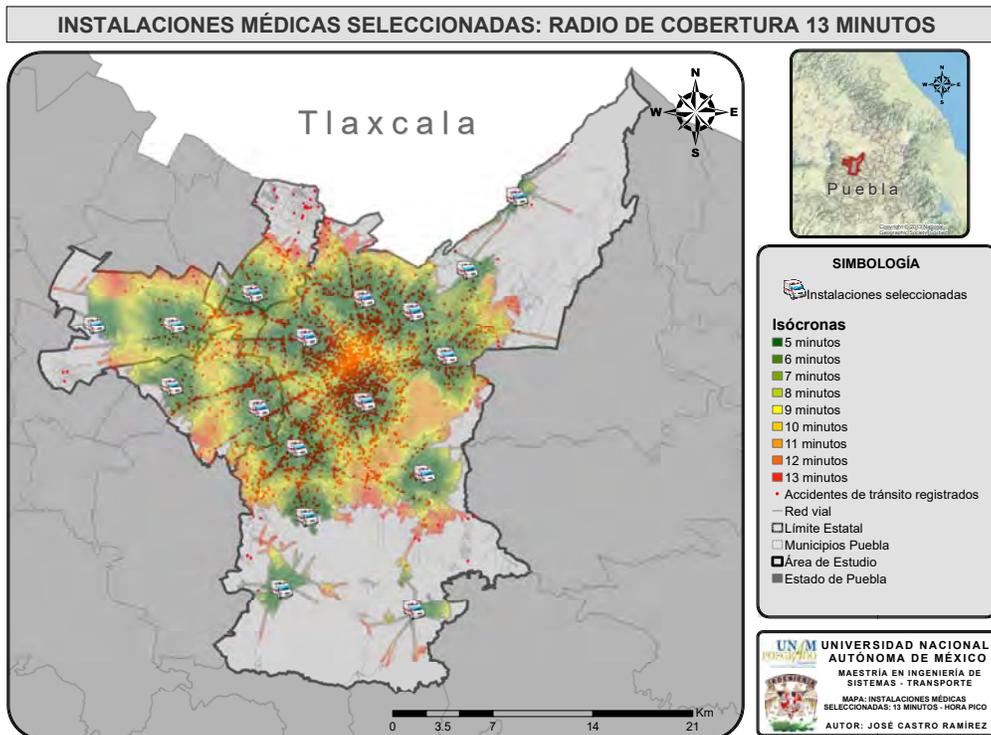
Mapa 34 Cobertura: 10 minutos en hora pico  
 Fuente: Elaboración propia



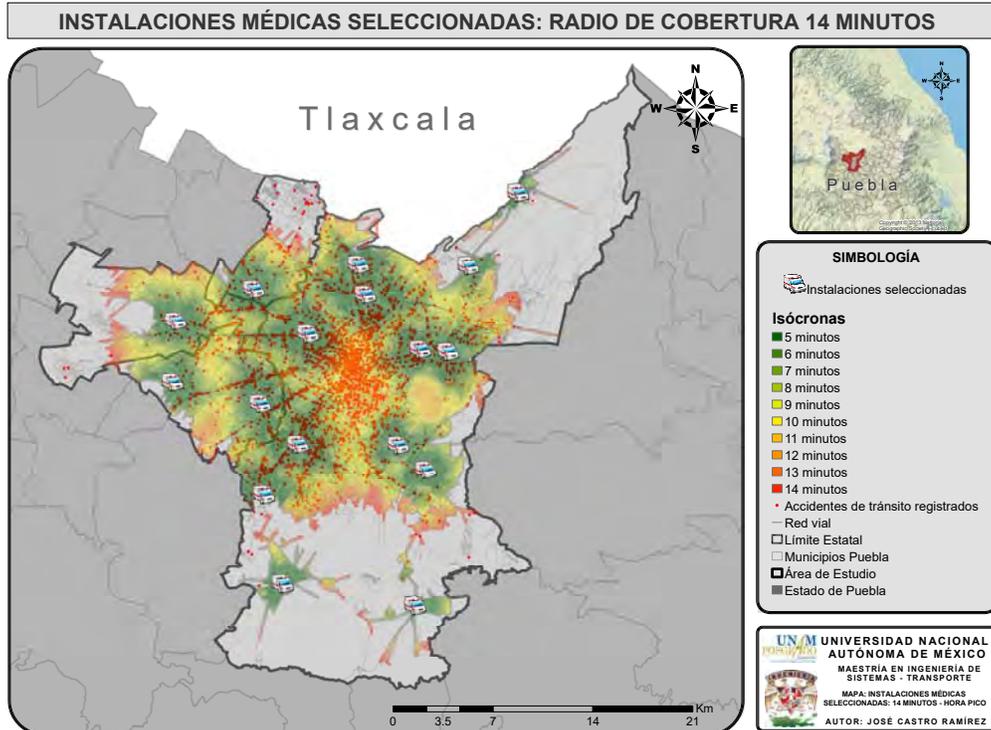
Mapa 35 Cobertura: 11 minutos en hora pico  
 Fuente: Elaboración propia



Mapa 36 Cobertura: 12 minutos en hora pico  
 Fuente: Elaboración propia



Mapa 37 Cobertura: 13 minutos en hora pico  
 Fuente: Elaboración propia



Mapa 38 Cobertura: 14 minutos en hora pico

Fuente: Elaboración propia

Las instalaciones seleccionadas para cada isócrona de cobertura en la Tabla 18, para complementar dicha información se sugiere consultar la Tabla 14 y así conocer la ubicación exacta de las instalaciones seleccionadas en función del ID de la instalación.

Isócrona	ID de instalaciones seleccionadas
5 minutos	3, 6, 7, 8, 9, 12, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 28, 29, 30, 33, 34
6 minutos	1, 3, 5, 6, 7, 9, 12, 17, 18, 19, 20, 27, 28, 29, 30, 32, 34
7 minutos	1, 3, 5, 6, 7, 9, 12, 14, 15, 17, 19, 20, 27, 28, 29, 30, 34
8 minutos	1, 3, 6, 7, 9, 12, 14, 15, 19, 20, 24, 27, 28, 29, 30, 34, 35
9 minutos	1, 3, 6, 7, 9, 10, 14, 15, 19, 20, 24, 27, 28, 29, 30, 34, 35
10 minutos	1, 3, 5, 6, 7, 9, 12, 14, 15, 17, 19, 20, 24, 28, 29, 30, 36
11 minutos	1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 24, 28, 29, 30
12 minutos	1, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 15, 16, 17, 19, 24, 27, 28, 30, 34, 36
13 minutos	1, 3, 5, 6, 7, 9, 11, 14, 16, 17, 19, 20, 24, 26, 28, 30, 32
14 minutos	1, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 15, 16, 17, 19, 20, 24, 26, 27, 28, 30

Tabla 18 Instalaciones seleccionadas por isócrona en horario pico

Fuente: Elaboración propia



En resumen, los resultados para el escenario en horario pico son:

- El 61% de los servicios solicitados en el periodo de estudio son cubiertos en un periodo de cinco minutos, de los cuales el 55% de los servicios pueden ser cubiertos por dos ambulancias y el 61% por cuatro ambulancias dentro del mismo periodo.
- Con una cobertura de seis minutos; el 73% de los servicios son cubiertos por dos ambulancias y un 4% más podrían ser atendidos por tres ambulancias dentro de los seis minutos. Con la distribución de ambulancias propuesta se logra una cobertura general del 77.46% de los servicios registrados en el periodo de estudio, es decir, se incrementó en un 16.27% la cobertura con respecto al numeral anterior.
- La cobertura obtenida para un intervalo de nueve minutos es del 96.30% de servicios, de los cuales el 80% de los servicios pueden ser cubiertos por dos ambulancias y el 96% de éstos podrían ser atendidos por hasta cuatro ambulancias.
- Dentro de los 10 minutos de platino, solo el 3% de los servicios realizados en el periodo de estudio no podrían ser atendidos, así mismo, el 93% de los servicios atendidos puede ser cubiertos por 4 ambulancias.



## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

El tiempo de llegada a algún sitio en dónde sea solicitado un servicio de AMP es de gran importancia; ya que cuanto más pronto se reciba la atención médica las funciones vitales de las personas corren menor riesgo de sufrir afectaciones irreversibles. Además, en el caso de que las lesiones ameriten una atención médica especializada, la llegada a alguna institución de salud podría realizarse en menor tiempo; como resultado de la reducción en el tiempo de llegada al sitio del siniestro para la prestación de la atención médica de primer contacto.

Con base en el análisis de resultados mostrados en el capítulo IV del presente caso de estudio, queda demostrado que el objetivo general, así como los objetivos particulares de este trabajo de investigación fueron cubiertos utilizando las “bases propuestas” para los vehículos de ambulancias administradas por la SSEP en la zona de estudio.

Como se puede observar en las Tablas 15 y 17, la particularidad del algoritmo utilizado para el caso de estudio es que mientras se aumenta el tiempo de cobertura; tal vez la cobertura de isócronas marginales no mejore sustancialmente; sin embargo, un mismo servicio puede ser cubierto por una cantidad mayor de ambulancias conforme se incrementa el ancho del intervalo de cobertura.

Por otra parte, las distribuciones propuestas para los diferentes escenarios analizados durante el horario valle; a partir de los primeros cinco minutos se cubren más del 93% de los servicios solicitados durante el periodo de estudio, la principal relevancia en éste caso radica en que dentro de los 10 minutos de platino se puede cubrir un mismo servicio hasta con siete ambulancias.

Para el periodo pico, como era de esperarse, en cuestión de cobertura de servicios las condiciones son adversas a las obtenidas durante el periodo valle, tal que para una isócrona de cinco minutos la cobertura de servicios es del 61.19%; lo que refleja una disminución del 32.52% respecto a la cobertura obtenida en el horario valle.



Durante los 10 minutos de platino se podría atender un 97.31% de servicios, así mismo, el 1% de los servicios cubiertos podrían ser atendidos por cuatro ambulancias; mientras que para el periodo valle con el mismo ancho de intervalo de cobertura se podrían atender el mismo porcentaje de servicios con siete ambulancias.

Las herramientas SIG se de gran ayuda para manipular, analizar y presentar información relacionada con una decisión sobre localización de los vehículos en la zona de estudio. Así mismo, para la generación de mapas temáticos relacionados con el emplazamiento y cobertura de servicios de AMP para diferentes escenarios de estudio; dichos mapas servirán al tomador de decisiones para alcanzar con rapidez una solución razonable a los problemas de localización de múltiples instalaciones; teniendo como fundamento una metodología fundamentada teóricamente.

Con la utilización de técnicas de optimización para “los problemas de localización” ha sido demostrado que se obtienen ciertas ventajas en el uso de recursos involucrados (vehículos) en la AMP; el emplazamiento de las ambulancias es de vital importancia en el tiempo de llegada a algún sitio en donde se solicite algún servicio médico de primer contacto.

La metodología propuesta a diferencia de los modelos de cobertura simple; maximiza el número de servicios que podrían ser atendidos por más de un vehículo considerando como base un determinado intervalo de servicio, además, también se incluye un factor de congestionamiento (obtenido directamente en campo mediante la metodología de vehículo flotante) en las vialidades dentro de la zona de estudio. En consecuencia, el análisis de la situación prevaleciente dentro del periodo de análisis refleja con mayor certeza respecto al escenario de no haber considerado las condiciones de tránsito en la red vial de la zona de estudio.



## 5.2 Recomendaciones

Algunas recomendaciones para complementar el presente estudio son las siguientes:

- Extender la muestra considerada en el estudio de velocidades de recorrido, con el objetivo de que las velocidades de operación reflejen una mejor aproximación con las que se caracterizó la red vial de estudio a las condiciones reales de operación.
- Convertir el análisis estático a dinámico, en el cual se consideren los siguientes elementos: velocidades de tránsito en tiempo real dentro de la zona de estudio, elementos propios de la infraestructura vial que puedan ocasionar demoras durante el tránsito como: semáforos, reductores de velocidad, así como condiciones sociales (manifestaciones, cierres de vialidades, siniestros de tránsito, etcétera), así mismo considerar las características geométricas de las vialidades.
- Continuar con la recopilación de información histórica de los servicios realizados por las ambulancias de la SSEP; con el objetivo de realizar predicciones de sitios en donde se puedan solicitar servicios de AMP, así como identificar posibles puntos negros de siniestros de tránsito.
- Poner en ejecución las propuestas de ubicación de las “bases” de las ambulancias y cuantificar los tiempos de llegada a las ubicaciones de solicitud de servicios, para comparar con los resultados obtenidos teóricamente
- Se propone agregar en la base de datos de los registros de servicios realizados, la hora de salida de la ambulancia de la base y hora de llegada al sitio de la emergencia; con ello se puede complementar el estudio del tiempo de recorrido bajo las condiciones prevalecientes de tránsito en determinadas franjas horarias.
- Llevar a cabo una clasificación del motivo por el cual se solicita el servicio de AMP, por ejemplo: atropellados, heridos por arma de fuego, colisión vehicular, problemas respiratorios, entre otros, esto con la finalidad de



recalcular los centroides de reubicación en función de la severidad del posible servicio de AMP a atender, además de que con dicha clasificación se podría analizar si el equipamiento para una ambulancia localizada en determinada zona corresponde verdaderamente al necesario para cubrir determinado tipo de servicios característicos dentro de la zona de influencia de dicha ambulancia.

- Realizar un análisis de las trayectorias realizadas por los operadores de las ambulancias contrastando las rutas generadas en alguna plataforma de mapas digitales como: Google Maps, Wazee o Tom Tom



## BIBLIOGRAFÍA

- Aceves, R. G. (2007). *El problema de localización de servicios*. Distrito Federal: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Budiharto, U. (2012). Traffic accident blackspot identification and ambulance fastest route mobilization process for the city of Sarakarta. *Diario de Transporte*, 237-248.
- CEVECE. (2014). *Accidentes de Tránsito*. Estado de México: Centro Estatal de Vigilancia Epidemiológica y Control de Enfermedades.
- Church RL, R. C. (1974). The maximum covering location problem. *Papers Reg Sci Assoc*, 101-118.
- Colebrook, M. (2003). *Localización de servicios en redes*. Islas Canarias: Dpto. Estadística, Investigación Operativa y Computación.
- Colebrook, M. (2003). *Localización de servicios en redes*. Islas Canarias: Dpto. Estadística, Investigación Operativa y Computación.
- CONAPRA. (2015). *Informe sobre la Situación de la Seguridad Vial*. México: CONAPRA.
- Contreras, J. (2006). *Manual de normas y procedimientos en trauma*. Colombia: Universidad de Antioquia.
- Cowley, A. R. (1976). The Resuscitation and Stabilization of Major Multiple Trauma Patients in an Trauma Center Enviroment. *Clinical Medicine*, 14-22.
- Daskin, M. S. (2013). *Network and discrete location: Models, algorithms and aplicaciones*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Dessouky, M. (2006). Rapid distribution of medical supplies. In: Patient flow: reducing delay in healthcare. *Springer*, 309–339.
- Diario Oficial de la Federación. (2014). *Norma Oficial Mexicana NOM-034-SSA3-2013, Regulación de los servicios de salud. Atención Médica Prehospitalaria*. Distrito Federal: GDF.
- Diario Oficial de la Federación. (2014). *Norma Oficial Mexicana NOM-034-SSA3-2013, Regulación de los servicios de salud. Atención médica prehospitalaria*. Ciudad de México: SEGOB.
- Dibene, J. C., Maldonado, Y., Vera, C., & Oliveira, M. d. (2017). Optimizing the location of ambulances in Tijuana, Mexico. *Computers in Biology and Medicine*, 107-113.
- Dibene, J. C., Maldonado, Y., Vera, C., & Olivera, M. d. (2017). *Optimizing the location of ambulances in Tijuana, Mexico*. *Computers in Biology and Medicine*.
- G.Y. Handler y Mirchandani P.B. (1979). *Location in networks: Theory and algorithms*. Massachusetts: MIT Press.
- Gendreau, M., Laporte, G., & Semet, F. (1997). Solving an ambulance location model by tabu search. *Location Sci*, 77–88.



- Jia, H., Ordonez, F., & Dessouky, M. (2007). Solution approaches for facility location of medical supplies for. *Comput Indus Eng*, 257–276.
- Krajewski, L., Ritzman, L., & Malhotra, M. (2008). *Administración de operaciones*. México: Pearson Educación.
- Leknes, H., Aartun, E. S., & Andersson, H. (2016). Strategic ambulance location for heterogeneous regions. *European Journal of Operational Research*.
- Martínez, E. C. (2001). Transporte del paciente crítico en unidades móviles terrestres. *Asociación Mexicana de Medicina Crítica y Terapia Intensiva*, 130-137.
- Martínez, E. C. (2006). La historia de la ambulancia. *Asociación Mexicana de Medicina Crítica y Terapia Intensiva*, 103-104.
- Ministerio de Educación y Ciencia. (2007). *La actualización de las competencias profesionales: Sanidad y Formación Profesional*. España: Secretaría general técnica.
- OMS. (2015). *Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial*. Francia: OMS.
- Robledo, J. G. (2012). *Tesis doctoral: "Atención al paciente traumatizado grave y politraumatizado en una unidad de cuidados intensivos en la provincia de Salamanca"*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Secretaría de Salud del Estado de Puebla. (22 de Enero de 2017). información obtenida mediante plataforma de acceso a la información pública. Ciudad de México.
- Sendra, J. B. (2004). *Sistemas de Información Geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*. España: Ra-Ma.
- SSEP. (31 de Enero de 2017). <http://www.ss.pue.gob.mx>. Obtenido de <http://www.ss.pue.gob.mx/index.php/suma/tipo-de-ambulancias>
- Xueping, L., Zhao, Z., Zhu, X., & Wyatt, T. (2011). Covering models and optimization techniques for emergency response facility location and planning: a review. *Mathematical Methods of Operations Research*, 281-310.