



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“Localización de servicios de auxilio vial en
carreteras, estudio de caso: Autopista México –
Puebla”

T E S I S

Que para obtener el título de:
INGENIERO INDUSTRIAL

P r e s e n t a :
RODRÍGUEZ ISLAS DELIA ELSA

Director: Dr. Ricardo Aceves García

Ciudad Universitaria 2012



AGRADECIMIENTO

Dedico este trabajo a mis familiares, a mis amigos, a Gabriel Lara y, especialmente, a mis padres Evangelina Islas López y Salvador Rodríguez López.

Agradezco a todos mis profesores, principalmente al Dr. Ricardo Aceves García y a mi escuela.

ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
INTRODUCCIÓN	vii
I. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	1
<hr/>	
1.1 Información de mortandad a nivel internacional	6
1.2 Información de accidentes y mortandad a nivel nacional	9
1.3 Información de la autopista de cuota México – Puebla sobre accidentes y mortandad	12
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
<hr/>	
2.1 Caracterización y justificación del estudio	24
2.2 Propósito del estudio	28

III. MARCO TEÓRICO	29
<hr/>	
3.1 Sistemas de Información Geográfica (SIG)	29
3.2 Teoría sobre localización de servicios	31
3.3 Condiciones para el modelo a utilizar	33
3.4 Formulación matemática del problema	34
IV. ESCENARIOS DE SOLUCIÓN Y RESULTADOS	37
<hr/>	
4.1 Presentación de las alternativas de solución	37
4.2 Resultados obtenidos con la aplicación del algoritmo a la autopista México – Puebla	55
4.3 Solución óptima sugerida y recomendaciones	58
V. CONCLUSIONES	60
<hr/>	
BIBLIOGRAFÍA	viii

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Teoría sobre causalidad de los accidentes, efecto dominó.	2
Figura 2.	Triángulo de Heinrich.	3
Figura 3.	Distribución trimodal de la mortalidad por traumatismo, relacionando las causas de muerte con el tiempo transcurrido desde el accidente.	4
Figura 4.	Iceberg del costo por accidente.	6
Figura 5.	Estados de la República Mexicana.	12
Figura 6.	Corredores del sistema carretero nacional.	13
Figura 7.	Corredor México – Nuevo Laredo, 2005	16
Figura 8.	Autopista México – Puebla (marcada con el número 150).	24
Figura 9.	Segmento de alta peligrosidad del tramo de curvas peligrosas de México – Puebla	25
Figura 10.	Ambulancia equipada con el equipo necesario para responder a cualquier emergencia.	27
Figura 11.	Curvas de nivel que atraviesa la carretera México - Puebla.	38
Figura 12.	Carretera de cuota México – Puebla.	39
Figura 13.	Red de distancias, en kilómetros, y demanda (número de accidentes	41
Figura 14.	Esquema de red de la autopista México – Puebla con servicios de auxilio vial seleccionados por el algoritmo en comparación con los existentes	55
Figura 15.	Esquema de red de la autopista México – Puebla, primera instalación seleccionada	56
Figura 16.	Esquema de red de la autopista México – Puebla, segunda instalación seleccionada.	56

Figura 17. Esquema de red de la autopista México – Puebla, tercera 57
instalación seleccionada

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Causas principales de mortalidad a nivel mundial, 2008.	8
Tabla 2.	Indicadores de siniestralidad y acciones INEGI, 2011.	9
Tabla 3.	Principales causas de mortalidad nacional general.	11
Tabla 4.	Estadísticas del comercio exterior de México por principales aduanas	15
Tabla 5.	Comercio exterior total por modo de transporte.	17
Tabla 6.	Datos viales, Tránsito Promedio Diario Anual según carretera.	18
Tabla 7.	Accidentes en caminos federales por régimen de operación y autopista, 2007, 2008 y 2009.	19
Tabla 8.	Registro, por intervalos, del número de accidentes en la carretera México – Puebla cuota (2007).	21
Tabla 9.	Siniestralidad CAPUFE	22
Tabla 10.	Nodos existentes en la carretera México – Puebla.	37
Tabla 11.	Matriz de distancias, en kilómetros	40
Tabla 12.	Matriz de $h_i d_{ij}$.	42
Tabla 13.	Matriz de distancia por demanda, con Z_j^1 calculada	43
Tabla 14.	Matriz de distancia por demanda. El valor más pequeño de Z_j^1 se muestra en la fila “TOTAL” en letra negrita	44
Tabla 15.	Matriz de distancia por demanda con el valor mínimo para cada renglón-columna	45
Tabla 16.	Matriz de $h_i d_{i2}$.	46
Tabla 17.	Matriz de $h_i d_{i3}$.	47
Tabla 18.	Matriz de $h_i d_{i4}$.	48
Tabla 19.	Matriz de $h_i d_{i5}$.	49
Tabla 20.	Matriz de $h_i d_{i6}$.	50
Tabla 21.	Matriz de $h_i d_{i7}$.	51
Tabla 22.	Matriz de $h_i d_{i8}$.	52

Tabla 23.	Matriz de $h_i d_{i9}$.	53
Tabla 24.	Matriz de $h_i d_{i10}$.	54
Tabla 25.	Instalaciones seleccionadas por el algoritmo.	55
Tabla 26.	Matriz de distancias de la primera instalación seleccionada, con 30 minutos de tiempo promedio de llegada	56
Tabla 27.	Matriz de distancias de la segunda instalación seleccionada, con 30 minutos de tiempo promedio de llegada	56
Tabla 28.	Matriz de distancias de la tercera instalación seleccionada, con 30 minutos de tiempo promedio de llegada	57
Tabla 29.	Cobertura de las tres instalaciones principales, seleccionadas por el algoritmo, con tiempo máximo de respuesta: 30 minutos.	57
Tabla 30.	Cobertura de la red, con tiempo máximo de respuesta: 30 minutos.	58
Tabla 31.	Matriz de distancias obtenidas para la primera instalación, con 15 minutos de tiempo promedio de llegada	58
Tabla 32.	Cobertura de la red, con tiempo máximo de respuesta: 15 minutos.	59

Lo primero que se piensa al querer establecer un comercio o simplemente en la compra de una casa es: ¿En dónde quiero ubicarme? ¿Cuál es la localización geográfica que más me conviene? Hoy en día, la localización de los servicios es sumamente importante para minimizar costos y aumentar la efectividad del proceso, lo cierto es que la localización va a depender de los términos del servicio que se quiera prestar. Una herramienta básica para la solución de este tipo de problemas se deriva de una de las ramas de las matemáticas “la investigación de operaciones”.

El problema de localización de servicios se presenta en todas las organizaciones, ya sean grandes y pequeñas, públicas y privadas, ya que tienen la necesidad de ubicarse estratégicamente. El éxito o fracaso de una organización de cualquier sector, público o privado, depende en parte de la localización elegida. Este trabajo presenta el método P-mediana para encontrar la localización de las estaciones de auxilio vial deseable u óptimo.

Las estaciones de auxilio vial son construcciones situadas en carreteras, que cuentan con diferentes servicios para ayudar en percances carreteros, los principales servicios que se prestan son de primeros auxilios médicos, mecánicos y de información.

Es importante que cada carretera del país cuente con una red de distribución de servicios de auxilio vial, ya que estudios realizados sobre la probabilidad de vida después de haber tenido un accidente automovilístico es casi nulo si la atención médica llega tras haber transcurrido más de 30 minutos; por esta razón deben de existir servicios de auxilio vial perfectamente ubicados para dar apoyo a quien lo requiera.

Mediante la utilización de modelos matemáticos y Sistemas de Información Geográfica, se crearán alternativas para la ubicación de Estaciones de Auxilio Vial en lugares estratégicos, en el caso particular de la autopista México – Puebla, para que los servicios principales, sean más eficientes y la probabilidad de vida sea mayor.

I. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

1.1 Introducción

Las lesiones causadas a consecuencia del tránsito, iniciaron mucho antes de que existiera el primer automóvil, ya que desde que se circulaba en carruajes ocurrían accidentes, en donde se involucraban personas y animales. Con la aparición de los vehículos de motor, comenzaron a surgir registros de personas accidentadas y/o fallecidas a consecuencia de estos, el primer registro que se tiene es, el de un ciclista accidentado en el año de 1896.

Con la llegada de la Revolución Industrial y después de la Segunda Guerra Mundial (1945), la industria automotriz empieza a cobrar importancia al desarrollarse modelos más rápidos, seguros y eficientes, sin embargo, al mismo tiempo con estos adelantos, se provocan un mayor número de accidentes, siendo así que en el año de 1951 en Estados Unidos. Según las estadísticas, se producen un millón de muertes¹ por percances automovilísticos.

La palabra accidente es compleja para definir, por tanto la OMS ha utilizado las descripciones que se enlistan a continuación:

1. Evento en el que se produce un daño a un sistema definido, que perturba el producto presente o futuro del sistema.
2. Incidencia o evento involuntario y/o imprevisto, que puede derivar en una lesión o la muerte.
3. Evento no planificado, imprevisto y no deseado, generalmente con una consecuencia adversa.
4. Resultado adverso, que NO se debe a la casualidad ni al destino.

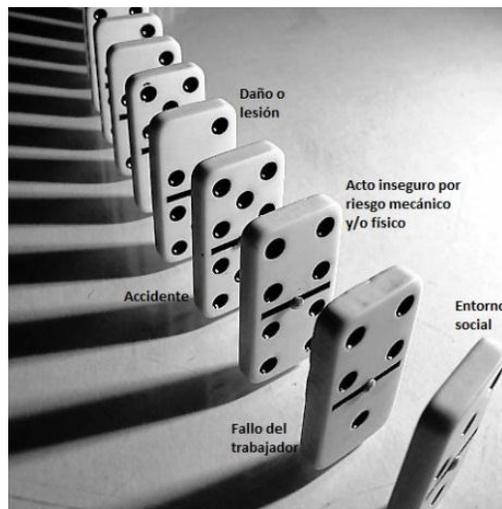
Por lo que el accidente se puede considerar como un evento involuntario, el cual produce daños y lesiones, mismo cual no se debe a la casualidad ni al destino, es decir, la mayoría de estos se pueden prevenir; el principio de la prevención señala que, todos los accidentes tienen causas de origen, las cuales pueden evitarse e identificarse y desde luego, controlar las causas que los producen.

¹ L. J. Norman. (1963).

Incidente que según la OMS, es “un evento o circunstancia que podría haber ocasionado u ocasionó un daño innecesario a un paciente”.

Existen teorías sobre la causalidad de los accidentes, como la teoría del “efecto dominó”, desarrollada por W. H. Heinrich (1931), pionero de la salud ocupacional, quien propuso la siguiente secuencia de factores en el accidente: entorno social, fallo del trabajador, acto inseguro por un riesgo mecánico y físico, accidente y daño o lesión; donde cada factor actúa sobre el siguiente de manera similar a como lo hacen las fichas de dominó, que caen una sobre otra (*figura 1*), es decir, si falla el factor humano o mecánico, va a fallar el medio ambiente y el social; pero si un factor es eliminado, como el acto inseguro por riesgo mecánico y físico, evitaría el accidente y el daño resultante, como lo que sucede si se retira una ficha de dominó de la fila.

Figura 1. Teoría sobre causalidad de los accidentes, efecto dominó².



Heinrich asegura que el 88% de los accidentes, se deben a los actos inseguros provocados por el factor humano, el 10% de los accidentes se deben a condiciones peligrosas y el restante 2% a hechos fortuitos. Adicionalmente, en los estudios realizados por Heinrich, también se sugiere que, por cada lesión grave hay 30 lesiones menores, 300 daños a terceros y 30,000 incidentes o daños no visibles (*figura 2*).

² BOTTA, Néstor A. (2007).

Figura 2. Triángulo de Heinrich³



Por otro lado Trunkey⁴ (1983) propone en su estudio, una distribución trimodal para el comportamiento de la mortalidad por traumatismo (*figura 3*), la que relaciona las causas de muerte con el tiempo transcurrido desde el accidente.

Esta distribución tiene tres picos de mortalidad:

1. El primer pico aparece dentro de los primeros segundos o minutos tras haber ocurrido el accidente, esta es una muerte casi inmediata causada por lesiones fatales, como trauma de tórax, laceraciones cerebrales, ruptura de aorta. En esta fase se producen alrededor del 50% de todas las muertes por traumatismo. Dentro de esta primera etapa, el 85% de los casos podrían tener más oportunidades de vida, si llegaran a la escena los paramédicos con equipo desfibrilador automático, en menos de 10 minutos tras ocurrido el accidente, debido a que la fibrilación ventricular es responsable de muerte súbita⁵.

³ Purdue University North Central, Center for Occupational Safety & Health. Extraído el 31 enero, 2012.

⁴ TORRES Morera, Luis M. 2001.

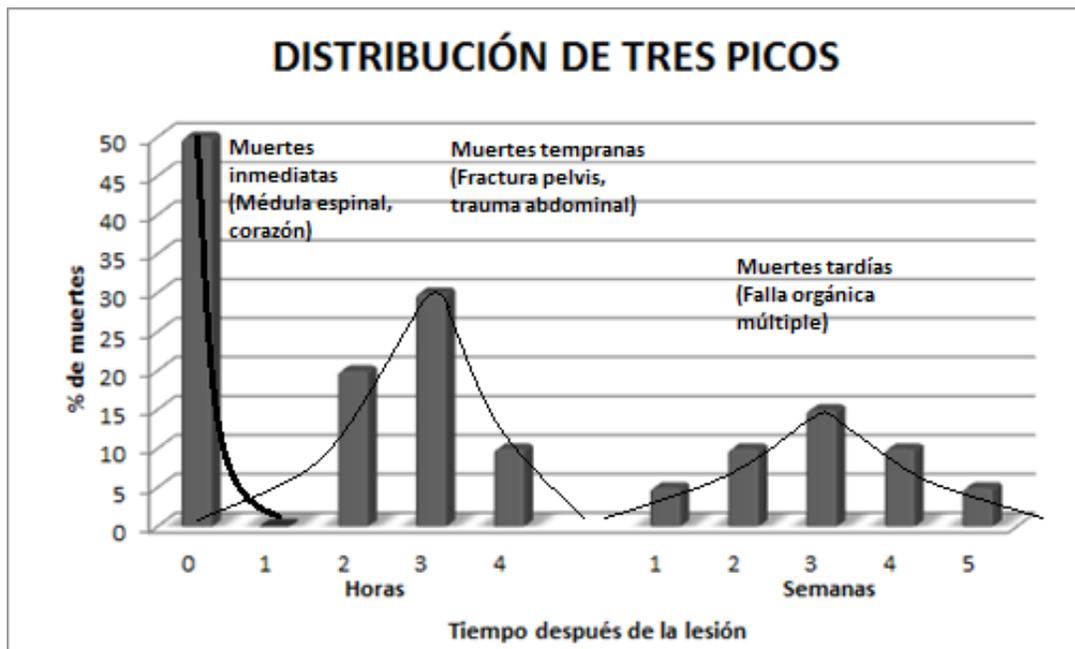
⁵ Lira Villavicencio, Manuel. 2008.

2. Este segundo momento de muerte ocurre, entre los primeros minutos y hasta 4 horas después de haber ocurrido el accidente. El 30% de accidentados se encuentra dentro de la segunda etapa, llamado de mortalidad temprana, en la cual, de no recibir atención médica, las personas mueren a causa de hipovolemia (disminución del volumen sanguíneo habitual) e hipoxia (déficit de oxígeno en un organismo).

3. El tercer pico de la distribución trimodal, corresponde al 15% de los casos, debido a falla orgánica múltiple (FOM), y va de 1 a 5 semanas.

Cabe destacar que la primera hora es vital y el “Comité de Trauma del Colegio Americano de Cirujanos (*Committee on Trauma of American College of Surgeons*), la ha denominado “hora de oro”.

Figura 3. Distribución trimodal de la mortalidad por traumatismo, relacionando las causas de muerte con el tiempo transcurrido desde el accidente.⁶



⁶ Programa avanzado de apoyo vital en trauma para médicos (ATLS). Extraído el 18 de enero de 2012

Lo que confirma los resultados obtenidos por Larson y Odoni⁷ (1973), los que establecen estándares internacionales del tiempo que debe tardar la atención médica en llegar a los sitios de los accidentes, indicando que este tiempo no debe exceder de 30 minutos en áreas rurales y de 10 minutos en áreas urbanas.

Por otro lado, también se han realizado estudios que han llevado a definir algunos métodos para determinar el costo de un accidente y, el más conocido es el denominado “Iceberg de los Costos” de F. E. Bird (1969). El cual establece que el costo es como una razón entre eventos adversos (graves y leves) e incidentes. Y determina que el costo que surge de un accidente o incidente, en realidad sólo constituye una fracción del costo total del mismo.

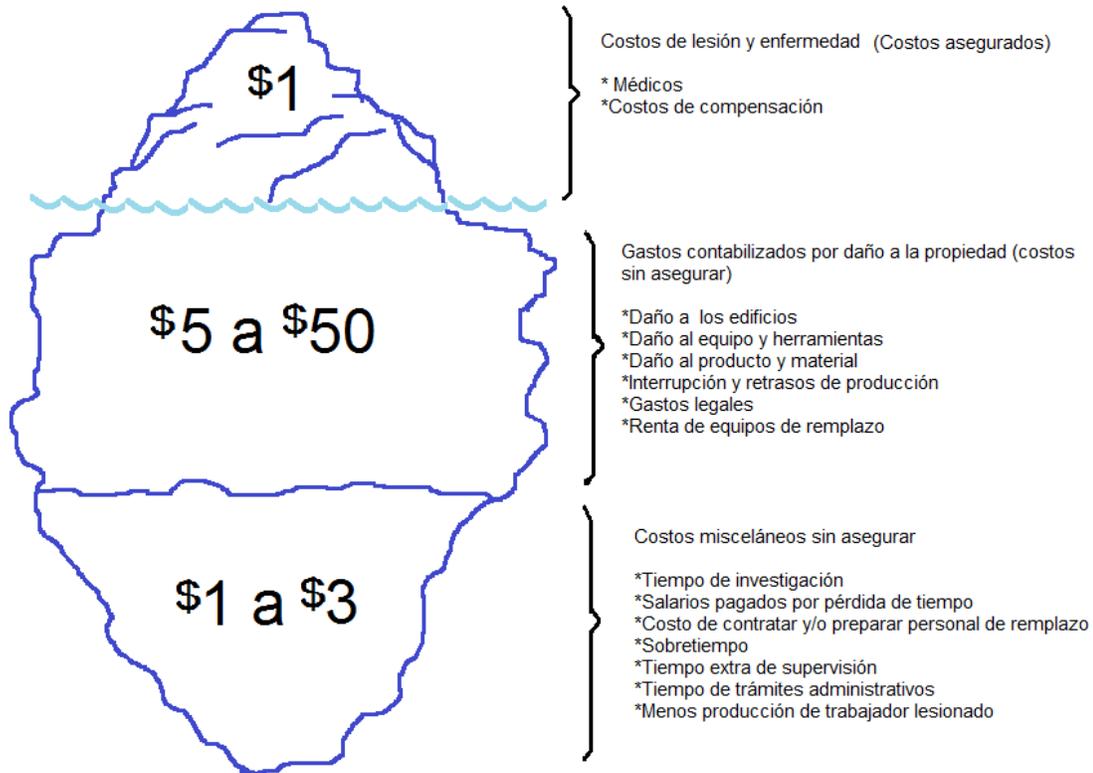
Así que, el costo que surge después de un accidente se les puede clasificar en dos tipos: uno es definido como asegurado y al otro como costo oculto o sin asegurar. El costo asegurado incluye atención médica, hospitalización, rehabilitación, etc. Mientras que el costo oculto se divide en dos, gastos contabilizados por daño a la propiedad y costos misceláneos sin asegurar.

En el primer caso se tienen a los costos por daños a terceros, por ejemplo, daños a edificios, al equipo y herramientas, al producto y material, así como interrupción y retrasos de producción. El costo misceláneo sin asegurar, incluye tiempo de investigación, salarios pagados por pérdida de tiempo, costos de contratar y capacitar personal de remplazo, entre otros. Y a esta clasificación, se le ha representado con la figura de un iceberg (*figura 4*).

⁷ QUINTERO PEREDA, Francisco Luis. (1999)

Figura 4. Iceberg del costo por accidente⁸.

Por cada \$100.00 de la actividad económica :



1.2 Información de mortandad a nivel internacional⁹

Las defunciones por lesiones causadas por accidentes de tránsito debidas a vehículo automotor, representan una epidemia silenciosa que afecta a todos los sectores de la sociedad.

Existen registros sobre las diversas causas de mortalidad en el mundo, una de las principales son los accidentes producidos con vehículo automotor, este problema se encuentra con mayor presencia en países de ingresos medios y altos, debido principalmente al aumento en la tasa de motorización, la que va asociada con el

⁸ BIRD, Jr., Frank E. (1985).

⁹ Organización Mundial de la Salud. (2004).

incremento del parque vehicular y su uso, generado por el crecimiento económico de los mismos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS)¹⁰ reporta que los decesos mundiales debidos a accidentes con automóvil, para el año 2004 fueron 1.3 millones de personas (*tabla 1*), mientras que en el año 2008 fueron 2.15 millones y se prevé que para el año 2030 aumentará a 2.4 millones. Sin embargo, también se debe considerar que los accidentes de tránsito provocan daños o alguna incapacidad física, por lo que a nivel mundial se registra un promedio de 50 millones de personas afectadas. Y son la principal causa de muerte entre los jóvenes con edades que van desde los 15 a los 29 años.

Por lo que se debe considerar que, los accidentes con automóvil son un problema sumamente grave, especialmente debido a motivos como:

- las redes viales no están bien planificadas;
- características físicas de los jóvenes (por ejemplo, la estatura de los niños), aumentan su riesgo;
- la presión de los compañeros, tendencia a adoptar comportamientos de riesgo;
- exceso de velocidad y conducir bajo los efectos de alcohol;
- no utilizar cinturón de seguridad.

En 2008 la OMS estimó, que fallecen alrededor de 1,3 millones de personas en las carreteras de todo el mundo, situación que se agrava, debido a que muchos países no cuentan con servicios médicos de emergencia para las víctimas en las carreteras, elevando así el número de decesos por la carencia de este servicio público.

¹⁰ Organización Mundial de la Salud. (2008).

Tabla 1¹¹. Causas principales de mortalidad a nivel mundial, 2008.			
No.	Causa	No. Estimado de muertes (en millones)	Porcentaje del total de muertes
1	Cardiopatía isquémica	7.2	12.2
2	Afección cerebro vascular	5.7	9.7
3	Infecciones de las vías respiratorias inferiores	4.2	7.1
4	Enfermedad pulmonar obstructiva crónica	3.0	5.1
5	Enfermedades diarreicas	2.2	3.7
6	VIH/SIDA	2.0	3.5
7	Tuberculosis	1.5	2.5
8	Cánceres de tráquea, bronquios o pulmón	1.3	2.3
9	Traumatismo por accidentes de tráfico	1.3	2.2
10	Prematuridad y peso bajo al nacer	1.2	2.0
11	Infecciones neonatales	1.1	1.9
12	Diabetes mellitus	1.1	1.9

Si se considera el costo económico que generan las colisiones y lesiones causadas por los accidentes de tránsito de cada país, éste asciende al 1% del producto nacional bruto (PNB) para países de bajos ingresos, mientras que en países de medianos ingresos es del 1,5% y del 2% para los de altos ingresos. De esta manera, el costo mundial se estima en US\$ 518,000 millones anuales, de los cuales US\$ 65,000 millones corresponden a países de bajos y medianos ingresos.

Debido a las cifras del número de accidentes y a su crecimiento anual, la Asamblea General de las Naciones Unidas (2005) ha adoptado el “Día mundial en recuerdo de las víctimas por accidentes de tráfico”, y exhorta a los gobiernos a declarar el tercer domingo de noviembre, para ofrecer reconocimiento a las víctimas de estos accidentes y atraer la atención del público hacia el tema de accidentes de tráfico, sus consecuencias y costos, además de las medidas que se pueden adoptar para prevenirlos.

¹¹ *The global burden of disease. (2008)*

1.3 Información de accidentes y mortandad a nivel nacional

Según José Córdova¹² (2011) el costo económico anual por accidentes en el país es del orden de 126,000 millones de pesos, ya que se producen al año alrededor de 4 millones de accidentes viales, y por los cuales se hospitalizan alrededor de 750,000 personas anualmente. Ocurriendo el 35% de los accidentes automovilísticos en carreteras mexicanas, durante los períodos vacacionales.

En la siguiente *tabla* se muestran los accidentes, daños y costos totales de los accidentes producidos en México durante un año (2009)¹³.

Tabla 2 ¹⁴ . <i>Indicadores de siniestralidad y acciones INEGI, 2011.</i>				
Entidad federativa	Accidentes	Lesionados	Muertos	Daños materiales (Miles de pesos)
Estados Unidos Mexicanos	29,596.00	31,659.00	4,870.00	1,519,428
Veracruz de Ignacio de la Llave	2,572.00	2,835.00	387	139,397
Guanajuato	2,206.00	3,027.00	381	100,550
México	2,017.00	2,540.00	371	116,151
Michoacán de Ocampo	1,285.00	1,579.00	280	60,239
Guerrero	1,677.00	1,504.00	248	73,073
Puebla	1,379.00	1,609.00	233	79,200
Hidalgo	1,263.00	1,444.00	212	61,651
Campeche	801	951	184	40,278
Sonora	1,071.00	1,254.00	179	62,805
Nuevo León	1,042.00	1,241.00	174	62,488
San Luis Potosí	1,168.00	1,122.00	170	75,981
Tamaulipas	846	949	164	45,825
Colima	682	744	159	40,415
Oaxaca	880	918	152	48,132
Sinaloa	803	867	150	46,465
Chiapas	739	827	129	57,535
Zacatecas	794	890	123	41,843

¹² Córdova Villalobos, José Ángel. (2011).

¹³ Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2009).

¹⁴ INEGI. (2011).

(Continuación)				
Baja California	982	881	120	40,756
Durango	487	582	119	28,403
Jalisco	636	635	118	21,606
Tabasco	1,321.00	594	107	51,125
Nayarit	571	617	98	37,975
Morelos	496	403	90	17,502
Querétaro	592	496	79	29,174
Tlaxcala	568	489	72	21,580
Coahuila de Zaragoza	455	353	71	23,829
Yucatán	509	439	64	21,498
Distrito Federal^a	217	403	58	11,140
Baja California Sur	484	431	50	19,632
Quintana Roo	437	311	49	22,020
Aguascalientes	257	403	40	6,527
Chihuahua	359	321	39	14,624
Nota:	Cifras preliminares			
^a	Se refiere al área metropolitana.			

Con base en la *tabla 2*, se observa que los estados de México y Puebla se encuentran dentro de los primeros cinco con mayor número de accidentes en carreteras, 2,017 y 1 349 respectivamente, mientras que el Distrito Federal es el de menor número de accidentes (217), y en consecuencia, el número de lesionados es mayor para los estados de México y Puebla con 2,540 y 1,609 lesionados, como se muestra en la *tabla 2*, y, los daños materiales para estos estados fueron de 116 151, 79 200 y 11 140 miles de pesos, respectivamente, lo cual da una suma de 206,491 miles de pesos.

Según el anuario Estadístico de Accidentes en Carreteras Federales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes pertenecientes al año 2002, se muestra que aproximadamente el 93% de los accidentes ocurridos en la carretera, son por causa del estado físico del conductor, de los cuales se destaca el estrés, el alcohol, las drogas, el adormecimiento y la fatiga.¹⁵

¹⁵ Organización Mundial de la Salud. (2003).

Como se puede observar en la *tabla 3*, en nuestro país, la sexta causa de mortalidad es debido a accidentes de vehículos de motor, de ahí la importancia de tomar acciones para mitigar este problema.

Tabla 3 ¹⁶ . Principales causas de mortalidad nacional general.				
Orden	Descripción	Defunciones	Tasa ^{1/}	%
	Total	538,288	504.6	100.0
1	Diabetes mellitus	75,572	70.8	14.0
2	Enfermedades isquémicas del corazón	59,579	55.8	11.1
3	Enfermedad cerebrovascular	30,212	28.3	5.6
4	Cirrosis y otras enfermedades crónicas del hígado	28,422	26.6	5.3
5	Enfermedad pulmonar obstructiva crónica	20,565	19.3	3.8
6	Accidentes de vehículo de motor	16,882	15.8	3.1
7	Enfermedades hipertensivas	15,694	14.7	2.9
8	Infecciones respiratorias agudas bajas	15,096	14.2	2.8
9	Ciertas afecciones originadas en el periodo perinatal	14,767	13.8	2.7
10	Agresiones (homicidios)	13,900	13.0	2.6
11	Nefritis y nefrosis	12,592	11.8	2.3
12	Desnutrición calórico proteica	8,310	7.8	1.5
13	Tumor maligno de tráquea, bronquios y pulmón	6,697	6.3	1.2
14	Tumor maligno del estómago	5,509	5.2	1.0
15	VIH/SIDA	5,183	4.9	1.0
16	Tumor maligno de la próstata	5,148	4.8	1.0
17	Tumor maligno del hígado	5,037	4.7	0.9
18	Tumor maligno de la mama	4,840	4.5	0.9
19	Lesiones autoinfligidas intencionalmente (suicidios)	4,668	4.4	0.9
20	Tumor maligno del cuello del útero	4,031	3.8	0.7
	Causas mal definidas	10,514	9.9	2.0
	Las demás	175,070	164.1	32.5
^{1/} Tasa por 100,000 habitantes				
Las principales causas de mortalidad están basadas en la lista GBD de 165				

¹⁶ Secretaría de Salud/Dirección General de Información en Salud. (1979-2008).

1.4 Información de la autopista de cuota México–Puebla sobre accidentes y mortandad.

El estado de Puebla se localiza en el centro de México (*figura 5*), y ha sido un puente entre la capital del país y los estados del sureste y del suroeste mexicano. La capital del estado de Puebla, se encuentra ubicado a 111 km de la Ciudad de México.

Figura 5¹⁷. Estados de la República Mexicana.



La Unidad de Autopistas de Cuota de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, definió 14 principales corredores carreteros del país para unir zonas de suma importancia, con los principales puertos fronterizos (terrestres y marítimos) del país, como se muestra en la *figura 6*, cabe destacar que algunos tramos son libres, esto quiere decir que circular por ellas no tiene costo y otros son de cuota, en las que se debe pagar un peaje para utilizarlas.

¹⁷ Instituto Mexicano del Transporte. (2011).

Figura 6. Corredores del sistema carretero nacional¹⁸



La importancia de la carretera México - Puebla radica en que forma parte del corredor Puebla – Oaxaca – Cd. Hidalgo, que va desde el Distrito Federal hasta Cd. Hidalgo, Chiapas, pasando por Puebla y Oaxaca, con desviaciones a Huatulco y Salina Cruz; además de que constituye la comunicación terrestre más directa y rápida entre el Distrito Federal y el puerto de Veracruz .

Cabe destacar el gran valor comercial de este puerto, ya que por ejemplo, en 2011 manejó 19,342,112 toneladas de carga comercial, 11.7% más que en 2010. De acuerdo con el Resumen Estadístico del Movimiento de Carga y Productividad de la Administración Portuaria Integral de Veracruz, el rubro que hizo marcar la diferencia entre estos dos años fue el movimiento automotriz, ya que se movilizaron 1,066,760 toneladas, es decir, 27.4%, por arriba de las 837,265 toneladas registradas en 2010. Así, la exportación de vehículos movilizó 741,000 unidades, 27% más que las 583,000 maniobradas en el 2010. Con respecto a graneles agrícolas, se movilizaron 6,393,000 toneladas, es decir, el 12.9 % más en comparación con el año 2010. De este modo, se atendieron 2,042 buques, 15% más de los operados en 2010.

¹⁸ MARTNER PEYRELONGUE, Carlos. (2003).

Adicionalmente esta carretera, une al Puerto de Veracruz con el corredor México - Nuevo Laredo, que es en la actualidad por el que transita la mayor cantidad de carga hacia la zona norte del país.

En la *figura 6*, se observa que son seis los corredores que tienen como destino la frontera norte del país: Transpeninsular de Baja California, México – Nogales con ramal a Tijuana, Querétaro – Ciudad Juárez, Mazatlán – Matamoros, México – Nuevo Laredo con ramal a Piedras Negras y Veracruz – Monterrey con ramal a Matamoros.

Según un estudio (Camacho Rosalía 2005)¹⁹, cuatro puentes fronterizos son dedicados al intercambio de mercancía para la mayor parte de los estados del país, de los cuales, tres se localizan en el estado de Tamaulipas: el Laredo/Nuevo Laredo, McAllen/Reynosa y Brownsville/Matamoros, el cuarto es el Laredo/Colombia, que pertenece al estado de Nuevo León, siendo el de mayor importancia el Laredo/Nuevo Laredo. Los estados que realizan intercambio de mercancía por medio de dichos puentes son: Campeche, Chiapas, Distrito Federal, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Tabasco, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz, Yucatán y Zacatecas. Por esto, se infiere que gran parte de los transportistas necesariamente utilizan el corredor México – Nuevo Laredo para llegar a uno de estos cuatro cruces. Incluso el puerto seco de Nuevo Laredo, se ha colocado como el más importante de comercio internacional por tierra de Latinoamérica, con más de 9 millones 108 mil 512 de operaciones (entre exportaciones e importaciones), durante el 2011, significó un ingreso de dos billones 194 mil 797 millones 406 mil 282 pesos²⁰. Más detallado, en la *tabla 4*, se muestra que la aduana de Nuevo Laredo, Tamaulipas se contó con un comercio exterior con valor de 3 617.8 millones de dólares para el año 2010 y 4 113.4 millones de dólares para el 2011, con una participación total de 13.4% y 14.1%, respectivamente.

¹⁹ Camacho Lomelí, Rosalía. (2005).

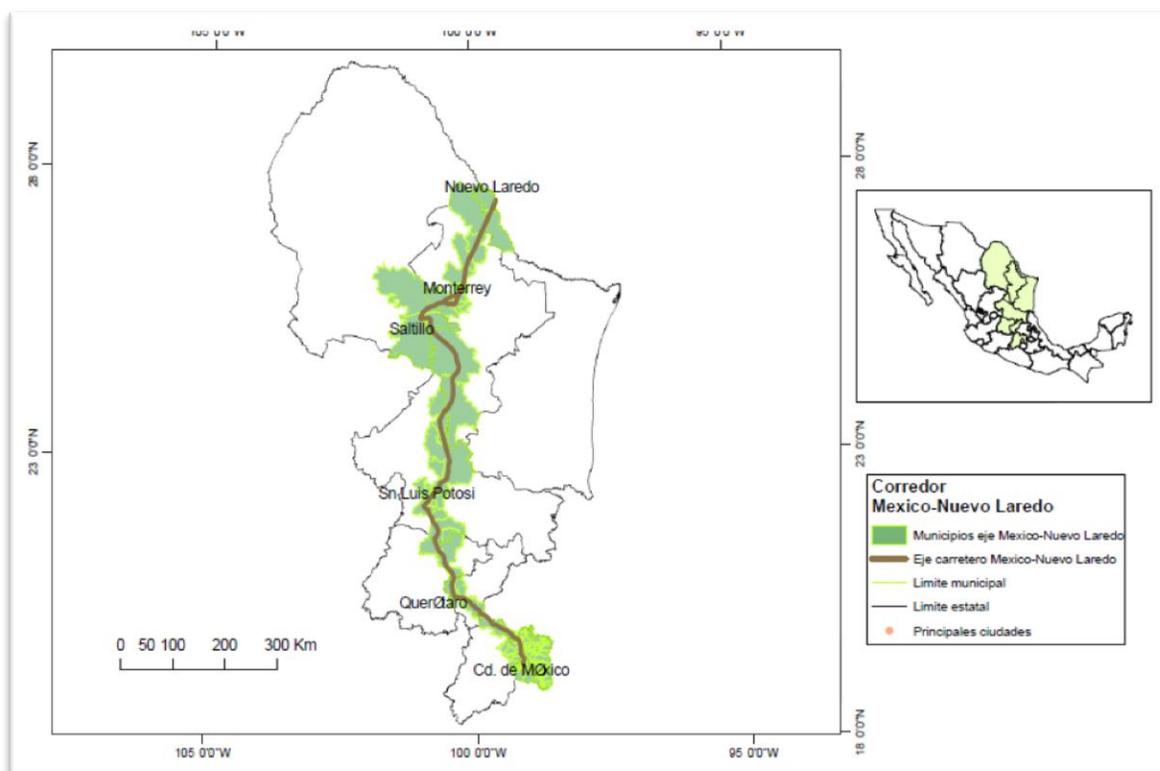
²⁰ Entorno, Grupo Editorial Argos. (2012).

Tabla 4²¹. Estadísticas del comercio exterior de México por principales aduanas					
Concepto	Valor (Millones de dólares)		Participación en el total (Porcentaje)		Variación anual (Porcentaje)
	2010 P	2011 P	2010 P	2011 P	2011/2010
Exportación total	14,787.7	15,699.7	54.9	53.9	6.2
Nuevo Laredo, Tamps.	3,617.8	4,113.4	13.4	14.1	13.7
Cd. Juárez, Chih.	3,349.8	3,365.9	12.4	11.6	0.5
Tijuana, B.C.	1,928.8	2,019.4	7.2	6.9	4.7
Colombia, N.L.	1,422.4	1,605.6	5.3	5.5	12.9
Cd. Reynosa, Tamps.	1,465.7	1,382.0	5.4	4.7	-5.7
Nogales, Son.	695.3	746.8	2.6	2.6	7.4
Las demás aduanas	2,307.8	2,466.6	8.6	8.5	6.9

El corredor México-Nuevo Laredo recorre 124 municipios, en donde se encuentran 5 zonas metropolitanas (*figura 7*), que son la Ciudad de México, Querétaro, San Luis Potosí, Saltillo y Monterrey, por lo que se puede deducir que es sobre esta red donde se localizan las zonas metropolitanas económicamente más importantes dentro del país.

²¹ INEGI. (2011).

Figura 7¹⁹. Corredor México – Nuevo Laredo, 2005.



Y la importancia de la autopista México - Puebla se extiende aún más, debido a que forma parte de la “Ruta Panamericana”. Esta ruta originalmente comienza en la ciudad de Laredo, Texas en Estados Unidos de América y termina en Buenos Aires, Argentina; para fines turísticos se amplió desde Alaska hasta Ushuaia, Argentina, es decir, atraviesa todo el continente americano. En el territorio Mexicano, la ruta panamericana, abarca desde Nuevo Laredo, pasando por Monterrey, Linares, Ciudad Victoria, Jacala, Ciudad de México, para terminar en el corredor Puebla – Oaxaca – Ciudad Hidalgo.

En la actualidad, el sistema carretero sigue y seguirá siendo uno de los principales instrumentos para movilizar las cadenas de producción y distribución de mercancías en el territorio nacional, atendiendo también en forma simultánea, las actividades de exportación y de turismo. Se representa, en la *tabla 5*, el comercio exterior por modo de transporte que, para el sistema carretero, se tuvo un valor de 14,787.7 millones de dólares para el año 2010 y 15,699.7 millones de dólares para el 2011. Por lo cual su mantenimiento y conservación permanentes, son de vital importancia para tener una red

carretera con adecuados niveles de servicio que satisfacen las necesidades de transportación de personas, mercancías y bienes, con criterios de seguridad, comodidad y eficiencia.

Tabla 5²¹. Comercio exterior total por modo de transporte.

Concepto	Valor (Millones de dólares)		Participación en el total (Porcentaje)		Variación anual (Porcentaje)
	2010 P	2011 P	2010 P	2011 P	2011/2010
Exportación total	26,945.5	29,142.0	100	100	8.2
Carretero	14,787.7	15,699.7	54.9	53.9	6.2
Marítimo	7,364.8	8,475.3	27.3	29.1	15.1
Ferroviario	2,718.2	3,052.9	10.1	10.5	12.3
Aéreo	1,334.0	1,216.9	5	4.2	-8.8
Otros	740.8	697.3	2.7	2.4	-5.9

Además de la importancia que tiene esta Autopista dentro del esquema de ejes carreteros, por los cuales se moviliza la mayor cantidad de mercancías del país. La unidad de Geotecnología Inteligente en Transporte y Sustentabilidad (GITS), que, en el marco del proyecto "Sistema de Información Geográfica de Carreteras de la Subsecretaría de Infraestructura" (SIGCSI-SCT) y como consecuencia de un convenio de colaboración celebrado entre el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Subsecretaría de Infraestructura de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, presenta resultados que a la fecha se han realizado sobre el Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA). En un estudio, realizado en el año 2007, sobre la autopista México – Puebla se estableció que circulan 26,396 vehículos en promedio diario anual²², y además, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) cada año realiza auditorías en las que se determina que el tránsito está compuesto por 20% de vehículos de carga, de los cuales 5% son tracto-camiones²³.

En dicho estudio se observa que la carretera México – Puebla se encuentra dentro de las primeras cinco carreteras más concurridas del país, esto se muestra en la *tabla 6*, tomando en cuenta 861 carreteras del país.

²² DGST-SCT. (2007).

²³ MENDOZA DÍAZ, Alberto. (2008).

Tabla 6²⁴. Datos viales, Tránsito Promedio Diario Anual según carretera.

NOMBRE DE LA CARRETERA	TPDA
San Pedro Barrientos – Ecatepec	46,910
México – Toluca	38,258
Zapotlanejo – Guadalajara (Cuota)	32,065
Libramiento de Cuernavaca	27,712
México – Puebla (Cuota)	26,396
Libramiento norte de Querétaro	24,812
Libramiento de Cabo San Lucas	22,290
México – Cuernavaca (Cuota)	20,246

Y como consecuencia de todo lo anterior, la autopista México – Puebla encabeza la lista de las carreteras (de cuota o federales) con más accidentes vehiculares por día. Ya que anualmente ocurren, en promedio, 1,683.20 accidentes. Seguida de la carretera Tepic – Mazatlán, con 1,490.00; la autopista México – Querétaro, con 1,047.00, y la carretera Querétaro-Irapuato, con 1,018.00 accidentes. Información recabada durante el periodo de 1997 a 2007, por la compañía Global-Mind²⁵ a través de software llamado: “Sistemas de Información sobre Accidentes Vehiculares (SIAV)” en México.

Mientras que el registro de los años 2007, 2008 y 2009, realizado por Caminos y Puentes Federales (CAPUFE), menciona que los accidentes dentro de la carretera México – Puebla fueron de 2,766, 2,804 y 2,686, respectivamente, esto implica que ha sido la carretera más accidentada dentro de la *tabla 7*. Cabe mencionar que el 10.47% del tránsito promedio diario anual presentó accidentes en el año 2007. Dentro de la misma lista, se posiciona en segundo lugar la autopista México – Cuernavaca, con un TPDA de 20,246, la cual presentó 1,457 accidentes, es decir, 7.19% del TPDA sufrió accidentes.

La carretera de cuota México – Puebla ocupó, en los años 2007, 2008 y 2009, el 14.14%, 15.44% y 15.76%, respectivamente, de accidentes en relación al total de la Red FNI (Fondo Nacional de Infraestructura).

²⁴ DGST-SCT. (2007).

²⁵ SIAV. (2011).

Tabla 7²⁶. Accidentes en caminos federales por régimen de operación y autopista, 2007, 2008 y 2009.			
Régimen Autopista	2007	2008	2009P
Red propia	662	566	453
Chapalilla - Compostela	167	153	149
Cosoleacaque - Nuevo Teapa a	233	302	216
Tuxtla Gutiérrez - San Cristóbal	193	ND	ND
Cauhtémoc - Osiris	69	111	75
Libramiento Durango - Entronque Otinapa	ND	ND	13
Red contratada	2,107.00	2,164.00	1,975.00
México - Tizayuca	1,012.00	1,011.00	863
Guadalajara - Colima	683	754	770
Asunción -Tejocotal	194	399	342
Atacomulco - Maravatío	218	ND	ND
Culiacán - Las Brisas	ND	ND	ND
Red FNI	19,558.00	18,150.00	17,038.00
Cuernavaca - Acapulco	2,290.00	1,255.00	1,098.00
Monterrey - Nuevo Laredo	121	235	270
Córdoba - Veracruz	321	307	369
La Tinaja - Cosoleacaque	559	655	699
León - Lagos - Aguascalientes	200	ND	ND
Mazatlán - Culiacán	281	466	414
Lib. Noreste de Querétaro	ND	ND	22
Cadereyta - Reynosa	ND	193	196
Libramiento Noreste de Querétaro	40	ND	ND
Cadereyta - Reynosa	134	ND	ND
Libramiento Oriente de Saltillo	107	58	73
La Carbonera - Puerto México	129	162	200
Guadalajara - Tepic	832	1,195.00	1,142.00
Guadalajara - Zapotlanejo	292	ND	ND
Libramiento Poniente de Tampico	1	ND	1
Zapotlanejo - Lagos de Moreno	323	ND	ND
Champotón - Campeche	53	13	9
Chamapa - Lechería	510	592	636
Maravatío - Zapotlanejo	732	ND	ND
Estación Don - Nogales	1,050.00	1,200.00	1,002.00
Gómez Palacio - Corralitos	151	83	110

²⁶ INEGI, CAPUFE. (2011).

(Continuación)			
Torreón - Saltillo	155	133	161
Reynosa - Matamoros	34	52	76
Pátzcuaro - Uruapan	228	252	200
Uruapan - Nueva Italia	113	71	155
Aguadulce - Cárdenas	135	165	139
México - Cuernavaca	1,457.00	1,681.00	1,532.00
Puente de Ixtla - Iguala	180	166	184
La Pera - Cuautla	154	192	165
Zacapalco - Rancho Viejo	22	30	19
Nueva Italia - Lázaro Cárdenas	53	0	167
Las Choapas - Ocozocoautla	295	337	277
México - Querétaro	1,564.00	1,409.00	1,322.00
México - Puebla	2,766.00	2,804.00	2,686.00
Querétaro - Irapuato	1,081.00	1,074.00	921
Puebla - Córdoba b	1,972.00	2,092.00	1,686.00
Tijuana - Ensenada	614	752	613
Tehuacán - Oaxaca	437	372	360
Rancho Viejo - Taxco	9	8	7
La Rumorosa - Tecate	133	134	122
Aeropuerto San José del Cabo	6	2	0
Salina Cruz - La Ventosa	ND	ND	5
Tihuatlán - Gutiérrez Zamora	24	10	0
^a Autopista libre de peaje. Para el cálculo del índice de siniestralidad se utilizó el tránsito registrado en el Puente Dovalí. ^b Incluye las autopistas Puebla - Acatzingo, Acatzingo - Ciudad Mendoza y Ciudad Mendoza - Córdoba. ND No disponible. ^p Cifras preliminares.			

En la *tabla 8* se muestran, los kilómetros de la autopista dividido en intervalos, con el número de accidentes existentes en dicho intervalo. Estos datos fueron obtenidos por el Departamento Geotecnología Inteligente en Transporte y Sustentabilidad y muestran un total de 287 accidentes en esta carretera de cuota. Cabe destacar que las curvas de alta peligrosidad comienzan en el kilómetro 56+000 y terminan en el 69+000. Por otra parte, las pendientes ascienden del kilómetro 00+000 al 56+000 y descienden del 57+000 al 95+000.

Considerando las características topográficas (pendientes y curvas) de la autopista, el número de accidentes por kilómetro que se presenta en la *tabla 8*, muestra ordenado por intervalos, el número de accidentes dependiendo del kilómetro en que se registró. Estos datos fueron obtenidos del Departamento Geotecnología Inteligente en Transporte y Sustentabilidad del Instituto de Geografía de la UNAM, mismos que muestran para el año de 2007 el reconocimiento de 312 accidentes en esta carretera de cuota.

Tabla 8²⁷. Registro, por intervalos, del número de accidentes en la carretera México – Puebla cuota (2007).

Intervalos de los km	Cantidad de accidentes
[01, 10)	0
[11, 20)	21
[21, 30)	95
[31, 40)	21
[41, 50)	23
[51, 60)	43
[61, 70)	22
[71, 80)	16
[81, 90)	22
[91, 100)	12
[101, 110)	10
[111, 120)	2
TOTAL	287

Debido a las pendientes y curvas que tiene esta carretera, se observa que los accidentes han sido de gran magnitud, como por ejemplo, el registrado el 21 de diciembre de 2010, aproximadamente a las 2:30 horas, en el kilómetro 33 + 300, cuando un camión cargado con unas 40 toneladas de varilla de hierro se impactó contra un retén de la Policía Federal y contra varios vehículos más, debido a una falla en los frenos. Diez

²⁷ IMT. (2007).

personas murieron en el lugar, tres más al ser trasladadas a hospitales de la zona, y otras más resultaron heridas, según se informó en TerraTV noticias²⁸ y CNN en español²⁹.

Otro accidente trágico sucedió el 26 de junio de 2011 a la altura del kilómetro 52 con dirección a la Ciudad de México, cuando el conductor de una camioneta minivan Windstar perdió el control, debido al aparente exceso de velocidad. Siete pasajeros perdieron la vida al momento: cinco mujeres, dos hombres y un menor de edad; otras tres personas más, con lesiones de gravedad, fueron trasladadas al hospital para recibir atención médica.^{30, 31}

El día 15 de enero de 2012, en el kilómetro 38, a consecuencia de lluvia y granizo, 43 vehículos se vieron involucrados en una carambola que afectó más de 20 kilómetros de circulación en ambos sentidos y que dejó un saldo de 20 personas lesionadas, tres de ellos se reportaron como graves³².

El costo del accidente varía dependiendo qué tan graves son los daños. Algunos montos estimados se presentan en la *tabla 9*.

Tabla 9³³. Siniestralidad CAPUFE

Año	Población	Fecha ocurrido	Dirección siniestro	Motivo reporte	Monto estimado
2011	San Martín	09/02/11	Autopista México Puebla San Martín 96+300, Caseta de Cobro 8	Colisión en caseta de cobro	\$ 1,000,000.00
2011	Puebla	29/04/11	Autopista México Puebla Dir. Puebla km 11 plaza de cobro 8	Choque lateral entre autos, tráiler y torton	\$ 2,000.00
2011	Puebla	29/04/11	Autopista México Puebla Dir. Puebla km 93+300	Choque Bora y camión volteo plata forma	\$ 20,000.00
2011	Edo. de México	03/05/11	Plaza de Cobro No. 7 "San Marcos km 21+000 autopista México-Puebla	Daños a vehículo de tercero	\$ 2,000.00

²⁸ TerraTV. (2010).

²⁹ CNN México. (2010).

³⁰ Informador.com.mx. (2011).

³¹ Zócalo Saltillo (2011).

³² Milenio. (2012).

³³ CAPUFE. (2011)

(Continuación)					
2011	San Martín	16/04/11	Autopista México Puebla Km 96+600 Dir., Caseta Fed. 8 Deleg. V Puebla	Daño a una cámara y domo	\$ 50,000.00
2011	Chalco	15/01/11	Km 33+300 México Puebla Dir. Puebla	Caseta de cobreo 7 daño a barrera carril 1b por vehículo tercero	\$ 4,000.00
2011	Edo. de México	15/07/11	Plaza de Cobro No. 7 "San Marcos" km 21+000 autopista México-Puebla	Daños cabina por colisión de vehículo	\$ 15,000.00
2011	Edo. de México	12/07/11	Plaza de cobro 4 "Tepotzotlán" km 43+300 autopista México-Querétaro	Daños a barrera de paso por colisión de vehículo	\$ 4,000.00

Con los casos anteriores se observa que muchas veces es difícil prevenir los accidentes debido a la falta de control, a las condiciones de la autopista o, simplemente, debido a condiciones climáticas; el hecho es que, el nivel de mortandad se podría disminuir si existen los medios para prestar servicios adecuados, es decir, con la existencia de servicios de auxilio vial distribuidos de manera estratégica en la carretera, cumpliendo con los parámetros internacionales propuestos por los estudios de Larson y Odoni¹ (1973).

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Caracterización y justificación del estudio

Una correcta ubicación geográfica de los servicios es necesaria e importante en cualquier proceso, pues generalmente en el caso de los servicios se trata de instalaciones valiosas y para las cuales el cambio de sede resulta poco práctico además de costoso. La localización de instalaciones y servicios es esencial y forma parte fundamental de un plan estratégico en cualquier organización, de tal manera que una buena selección de la ubicación puede contribuir a la realización de los objetivos, mientras que una mala localización puede tener un desempeño inadecuado en las operaciones. De esta manera, tanto dependencias gubernamentales como empresas privadas e incluso los individuos, tienden a buscar la ubicación óptima de sus bienes.

Figura 8. Autopista México – Puebla (marcada con el número 150).



Mediante el software ArcGis versión 10, se obtuvo la longitud real de la autopista de cuota México-Puebla, la cual fue de 110,91 kilómetros. Se determinó que entre el kilómetro 00+000 y el 56+000, en la dirección México – Puebla, la carretera asciende con pendientes de 5% y del kilómetro 57+000 al 95+000 desciende con pendientes del 5%.

Además existe un tramo de curvas peligrosas del kilómetro 56+000 al 69+000, habiéndose detectado una gran incidencia de accidentes particularmente en este tramo.

Figura 9. Segmento de alta peligrosidad del tramo de curvas peligrosas de México – Puebla



Por su cercanía a la Ciudad de México, esta carretera se encuentra a más de 2 mil metros sobre el nivel de mar, por lo cual en buena parte del año (otoño e invierno) su superficie se encuentra mojada o con hielo, siendo también frecuente la presencia de niebla en el camino, particularmente durante las madrugadas. Además, el material utilizado para la construcción de la mayor parte de esta carretera es asfalto¹, lo cual significa que no tiene una superficie tan estable para los automóviles, por su naturaleza flexible, como podría ser si estuviera construida con concreto hidráulico².

Existe un segmento de alta peligrosidad del tramo en descenso de México hacia Puebla, sentido en que el kilometraje crece. El segmento consiste en dos curvas continuas opuestas de grados 4.5 y 4 consecutivamente. La velocidad de proyecto de este segmento es de 100 kilómetro por hora y el límite máximo establecido de 90 kilómetros por hora. La carretera tiene dos carriles de 3.50 m en tangente, con acotamientos interno y externo de 0.50 y 1 m, respectivamente. Ambas curvas cuentan

¹ SCT. (2011).

² Building Sustainable Highways in Canada.

con las ampliaciones, sobreelevaciones y transiciones requeridas por las Normas de Proyecto Geométrico de Carreteras (SCT, 1984).

Tras un estudio riguroso de la carretera, realizado por el Instituto Mexicano del Transporte, se detectaron las siguientes anomalías¹⁷:

a) De acuerdo con la información dada anteriormente, las curvas opuestas de grados 4.5 y 4, tienen grados mayores que el máximo correspondiente a sus velocidades de acuerdo con las normas de proyecto geométrico de carreteras (3.5 grados).

b) Para las condiciones del segmento, tanto el ancho de carril como el ancho de los acotamientos interno y externo son menores a los mínimos especificados por las normas de proyecto geométrico de carreteras (3.65, 1 y 2.5 m, respectivamente).

c) Dado que los camiones de carga al circular por el carril de la derecha descienden a muy bajas velocidades (de manera similar a como lo hacen en el ascenso), se detectó que representan un serio riesgo para los autobuses y los vehículos ligeros que descienden a mucha mayor velocidad (a una velocidad promedio de más de 30 kilómetros por hora que la de los camiones de carga).

d) También se detectó la necesidad de mejorar el señalamiento vertical y horizontal, haciéndolo más claro.

Esta autopista cuenta con tres estaciones de auxilio vial ubicadas en los kilómetros, de México hacia Puebla, 33+300, 47+000 y 90+800; cada una cuenta con una ambulancia marca Chevrolet, submarca Express, modelo 1,500 (*Figura 10*) y equipadas con un maletín de medicamentos básico que contiene: aspirina, ketorolaco, metamizol, diclofenaco, ranitidina, metoclopramida, butilioscina, entre otros, tanques de oxígeno, tablas rígidas para adulto y pediátricas, collarines de diferentes medidas, chaleco de estricción, férulas de tracción, 1 ó 2 camillas, manejo de vía aérea básica (cánulas naso y orofaríngeas), y vía aérea avanzada como: laringoscopio, tubos endotraqueales de diferentes números, mascarillas laríngeas, fastrach, ventilados volumétrico pulsioxímetro, aspirador de secreciones, un desfibrilador automático externo (DEA), equipo de intubación

endotraqueal, equipo de parto y un maletín avanzado de medicamentos con fármacos para urgencias cardiovasculares y de resucitación como clopidrogel, adrenalina, atropina, sedantes relajantes musculares, etc. y más fármacos para la atención integral del paciente.

Los empleados con los que cuenta cada estación de auxilio vial son dos, tres o hasta cinco paramédicos, una pareja de estos paramédicos atiende la ambulancia, otro se encuentra atendiendo la unidad de señalamiento dinámicos (pantalla informativa en una camioneta); uno o dos paramédicos más para el camión de rescate urbano, este cuenta con equipo hidráulico para personas prensadas, equipo de rescate con cuerdas y equipo para materiales peligrosos (sustancias químicas, gases, entre otros); tres médicos coordinadores y tres médicos más que atienden los accidentes, muchas veces los mismos médicos también manejan las ambulancias, camiones de rescate y unidades de señalamiento.³

Figura 10. Ambulancia equipada con el equipo necesario para responder a cualquier emergencia.



³ Visita de campo. (2012).

2.2 Propósito del estudio

Considerando que la localización geográfica óptima para un servicio, depende de lo que se considere más importante en cada caso, como puede ser el tiempo de respuesta a los lugares de demanda, el costo que tiene moverse a los lugares de demanda, o bien, el que haya cobertura total sobre un área determinada. Por lo que para determinar la ubicación geográfica adecuada de un servicio, se deben definir primero los parámetros respecto de los cuales tendrá lugar la optimización. Condición que ha constituido la base para el planteamiento del llamado “problema de localización de servicios” y la búsqueda de su solución, a través de un conjunto de técnicas conocidas como “teoría de localización de servicios”.

Además de que según las estadísticas del INEGI, los accidentes de vehículo de motor forman parte de las diez principales causas de mortalidad en edades productivas, y que éstas representa una enorme pérdida desde el punto de vista de la capacidad productiva del país.

En particular y con el fin de disminuir en la carretera de cuota México – Puebla, las 26 defunciones que se registraron en el año 2007 y a su vez el costo de los accidentes que se genera al país. Además del sufrimiento causado a terceros por la defunción o invalidez permanente de los accidentados. Así como las fuertes pérdidas económicas que se producen a la sociedad, debido al elevado costo de los tratamientos médicos y quirúrgicos, la incapacidad laboral de la persona lesionada y los daños materiales.

Este trabajo de tesis realiza un estudio, para localizar los lugares más adecuados para la ubicación geográfica de *estaciones de auxilio médico vial*, en el tramo carretero México-Puebla. Considerando la afluencia vehicular, el número de accidentes al mes, tipo de accidentes al mes, frecuencia de accidentes, localización de retornos, entradas y desviaciones. Y utilizando la teoría de localización de servicios y los sistemas de información geográfica.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 *Sistemas de Información Geográfica (SIG)*

Un sistema de información geográfica se define como un sistema para la gestión, análisis y visualización de conocimiento geográfico que se estructura en diferentes conjuntos de información¹:

- *Mapas interactivos*. Proporcionan una visión interactiva de la información geográfica que permite dar respuesta a cuestiones concretas, y presentar un resultado de dichas respuestas. Los mapas proporcionan al usuario las herramientas necesarias para interactuar con la información geográfica.
- *Datos Geográficos*. En la base de datos se incluye información vectorial, modelos digitales del terreno, redes lineales, información procedente de estudios topográficos, topologías y atributos.
- *Modelos de Geoprocesamiento*. Son flujos de procesos que permiten automatizar tareas que se repiten con frecuencia, pudiendo enlazar unos modelos con otros.
- *Modelos de datos*. La información geográfica en la Geodatabase es algo más que un conjunto de tablas almacenadas en un Sistema Gestor de Base de Datos. Incorpora, al igual que otros sistemas de información, reglas de comportamiento e integridad de la información. Tanto el esquema, como el comportamiento y las reglas de integridad de la información geográfica juegan un papel fundamental en un Sistema de Información Geográfica.
- *Metadatos*. Son los datos que describen la información geográfica, facilitando información como propietario, formato, sistema de coordenadas, extensión, etc... de la información geográfica.

Un catálogo de metadatos permite al usuario organizar, realizar búsquedas y acceder a información geográfica compartida. Cualquier catálogo de metadatos debe tener herramientas disponibles para generar, editar y sincronizarse de forma automática con la información que describen los metadatos

¹ ESRI España, Entendiendo nuestro mundo. ¿Qué es un SIG? (2010) <http://www.esri.es/es/formacion/que-es-un-sig/>

Los SIG se han popularizado recientemente, pero la idea de utilizar herramientas informáticas para manejar entidades con componente espacial es bastante antigua. De hecho, está aceptado que el inventario forestal de Canadá, realizado en la segunda mitad de los años 60 bajo la dirección de Roger Tomlinson, fue la primera aplicación real, en la que se pusieron las bases de muchos de los conceptos que todavía seguimos aplicando. Por otra parte, el trabajo realizado en los primeros años 70 en el Laboratorio de Análisis Espacial de la Universidad de Harvard, fue el lugar en el que se formaron personas que después han liderado el desarrollo de la industria.

Durante los años 70 se comenzó la aplicación de los SIG a problemas específicos, como el planeamiento o el impacto ambiental, pero fue a principios de los años 80, con la aparición de ordenadores con terminales gráficos, cuando apareció en la industria, especialmente con la aparición de ARC/INFO como producto comercial en 1982². En la década de los 90 se creó una plataforma adecuada para desplegar toda la potencia de los SIG, aunque con altos precios que los han restringido a aplicaciones técnicas profesionales.

Actualmente, es una herramienta computacional cuyo objetivo fundamental es almacenar, modelar, analizar y desplegar la información geográficamente referenciada en forma digitalizada. Los mapas que se producen en una computadora comercial por medio de un SIG son de buena calidad cartográfica y cuentan con suficiente detalle para diseños de ingeniería, es lo más efectivo para los grupos de planificación encargados de analizar temas de peligros naturales en los proyectos integrados de desarrollo; sin embargo, existen SIG que son más complejos y demandan operadores altamente capacitados y también pueden requerir más tiempo y equipos más costosos, particularmente para los procedimientos de producción.

Los SIG se pueden utilizar en diferentes áreas como son:

- a) En la administración pública: Planeación regional, infraestructura municipal, administración de impuestos, planeación y ejecución de los servicios de emergencia.
- b) En el medio ambiente, seguridad y salud: Estudios sobre el medio ambiente, administración y manejo de desperdicios, emisión de

² *Revista General de Información y Documentación*. (94-95).

contaminantes en el aire, calidad del agua, análisis de procesos de alto riesgo, etc.

- c) Planeación de recursos: Dinámica de los recursos naturales, administración forestal, etc.
- d) Industria y comercio: Planeación del desarrollo urbano, investigación de mercado, bienes raíces, administración y control de operaciones, evaluación de la localización de proveedores/consumidores/competidores, toma de decisiones relacionada con el mantenimiento y supervivencia de la organización, etc.

Como se puede observar, la aplicación de esta herramienta es muy amplia tanto en el sector público, como en el privado, por tal razón se consideró que es de suma importancia incorporar los sistemas de información geográfica en la solución de problemas de investigación de operaciones.

3.2 Teoría sobre localización de servicios

El estudio de la teoría sobre localización de servicios comienza en el siglo XVII, cuando el matemático P. Fermat propuso el problema siguiente: Dados tres puntos en el plano, encontrar el cuarto punto tal que su distancia al resto sea mínima. Posteriormente, en el año de 1647, el matemático Bonaventura Cavalieri consideró el problema de: Determinar un punto, tal que la suma de sus distancias a otros tres puntos dados, fuera mínima. Además, demostró que cada lado del triángulo formado por los otros tres puntos debe tener un ángulo menor a 120 grados, con la línea de uno de los dos vértices del lado el punto dado. En 1774, Giovanni Fagnano demostró que el punto para el cual la suma de las distancias a los vértices de un cuadrilátero es mínima, está dada por la intersección de las diagonales y el matemático francés Tedenat, en 1810, encontró para el caso de n puntos, la siguiente condición necesaria: la suma de los cosenos y senos de los ángulos anteriormente mencionados debe ser igual a cero.

Sin embargo, una de las primeras referencias sobre la teoría de localización moderna, es decir, como la herramienta matemática para resolver problemas de un tipo específico, fue introducida en 1909 por Alfred Weber, cuando consideró el problema de Fermat al Análisis de Localización en su tratado sobre la teoría de la localización industrial el problema consistía en determinar la localización óptima de una fábrica que debía minimizar la distancia total que se viajaría para atender a un conjunto de clientes espacialmente distribuidos, de ahí, el criterio considerado para tal localización era la minimización de los costos de transporte (distancia a recorrer), este fue el comienzo de los problemas de localización en un plano usualmente conocidos como problemas mediana o simplemente problemas de Weber. Siguió a los trabajos de Weber los del economista Harold Hotelling quien se planteó, en 1929, otro de los primeros problemas de localización; al considerar el problema de localizar a dos empresas competidoras sobre la misma línea recta; durante las décadas de los 50's y de los 60's varios autores atendieron el problema del diseño e implementación de sistemas de servicios, considerando algunos factores económicos y la posibilidad de emplear de la teoría de redes.

De este modo surge el comienzo de estudio de la teoría de redes por Jordan, quien obtuvo una caracterización del conjunto mediana de un árbol.

En 1964, a raíz de la publicación de un artículo acerca de las investigaciones de S. Louis Hakimi, se despertó en los científicos un fuerte interés teórico por problemas de la mediana y el centro sobre redes generales. En tal trabajo se planteaba el problema de localizar uno o más servicios en una red tratando de minimizar la suma de la distancia más larga entre los servicios y los puntos de demanda.

De esta manera, el campo de investigación en el área de localización de servicios ha permanecido activo cerca de 40 años, bajo el enfoque común de la teoría de localización.

3.3 Condiciones para el modelo a utilizar

En todos los servicios que se proporcionan, ya sea dentro del sector público o del privado, existen problemas comunes como los de localización de instalaciones por lo menos una vez en su historia. Para resolverlos, se cuentan con múltiples modelos o algoritmos dependiendo del giro de la empresa y para determinar el modelo, según Daskin (1995)³, se deben de tener en cuenta una serie de cuestiones, las cuales incluyen las siguientes:

- a) ¿Cuántas instalaciones deberían ser situadas?
- b) ¿En dónde deberían localizarse cada una de las instalaciones con las que cuenta la empresa?
- c) ¿Qué capacidad deberían tener las instalaciones?
- d) ¿Cómo debe distribuirse o destinarse la demanda a las instalaciones?

Para el caso en estudio, al ser un servicio que proporciona auxilio, la asistencia debe de llegar lo más rápido posible, en un máximo de treinta minutos a partir de la llamada recibida, según Larson y Odoni¹ (1973), de no ser así y tener una deficiente localización, la pérdida podría ser incosteable debido a que se perderían vidas humanas. Las variables más importantes, para este problema, serán el tiempo promedio que le toma llegar a una ambulancia al lugar del accidente y la distancia que existe entre las instalaciones y el cliente.

Indicar antes los tipos de modelos que se tienen en la localización de servicios a través de alguna clasificación y después porque seleccionar lo de redes.

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

³ DASKIN S., Mark. (1995).

Para resolver este tipo de problemas de localización se tiene el modelo “problemas de la mediana” o también conocido en inglés como “P-median problem” que principalmente se utiliza para encontrar la localización de un número dado de instalaciones para minimizar la distancia promedio entre el cliente y la instalación más cercana.

En los problemas de P-mediana, la relación que existe entre la distancia entre los nodos de las instalaciones y de la demanda y el costo asociado con las instalaciones es usualmente lineal.

3.4 Formulación matemática del problema

El problema de la p-mediana sirve para encontrar la localización de P instalaciones en una red en donde el costo total sea minimizado. El costo de atender demanda en el nodo i está dado por el producto de la demanda en el nodo i y la distancia entre el nodo de demanda i y las instalaciones más cercanas al nodo i . Este problema se formula de la siguiente manera:

En donde:

$h_i =$ demanda en el nodo i

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

$P =$ número de instalaciones a localizar

VARIABLES DE DECISIÓN:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_j = 1 \text{ si se ubica la mediana en el sitio candidato } j \\ 0 \text{ en otro caso} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{ij} = \\ 1 \text{ si las demandas del nodo } i \text{ son cubiertas por las instalaciones en el nodo } j \\ 0 \text{ en otro caso} \end{array} \right.$$

Con esta notación, el problema de P-mediana puede ser formulado:

$$\text{Min } \sum_i \sum_j h_i d_{ij} Y_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_j X_j = P \quad (3)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i, j \quad (4)$$

$$X_j = 0,1 \quad \forall j \quad (5)$$

$$Y_{ij} = 0,1 \quad \forall i, j \quad (6)$$

Las restricciones (2) requieren que cada demanda del nodo i le sea asignada exactamente una instalación j . La restricción (3) establece que exactamente P instalaciones necesitan ser situadas. Las restricciones (4) vinculan las variables de ubicación (X_j) y las variables de asignación (Y_{ij}). En donde establecen que las demandas del nodo i , sólo pueden ser asignadas a las instalaciones localizadas en j ($Y_{ij} = 1$), si una de las instalaciones es localizada en el nodo j ($X_j = 1$). Las restricciones (5) y (6) son las condiciones estándar de integralidad.

Existen diferentes maneras para resolver el tipo de problema de p-mediana, en este caso se empleará un algoritmo heurístico llamado “algoritmo miope”⁴, se le dice miope debido a que la visión del algoritmo es seleccionar el mejor resultado actual sin tomar en cuenta lo que pueda ocurrir en el futuro.

Los pasos para la resolución de un problema de p-mediana utilizando un algoritmo miope son los siguientes:

1. Comenzar con $k = 0$; en donde k contará el número de instalaciones que se localizarán. Y $X_k = \emptyset$; en donde X_k dará la localización de las k instalaciones que se habrán localizado en cada etapa del algoritmo.
2. Incrementar k (k es el contador del número de instalaciones ubicadas).

⁴ Metaheurística. (2007).

3. Calcular $Z_j^k = \sum_i h_i d(i, j \cup X_{k-1})$ para cada nodo j que no esté en el conjunto X_{k-1} .
4. Encontrar el nodo $j^*(k)$ que minimiza Z_j^k , que es, $j^*(k) = \arg \min_j \{Z_j^k\}$. Nótese que $j^*(k)$ da la mejor localización para la k -ésima instalación, dada la localización de las $k - 1$ instalaciones. Agregar el nodo $j^*(k)$ al conjunto X_{k-1} , para obtener el conjunto X_k ; esto es, el conjunto $X_k = X_{k-1} \cup j^*(k)$. Calcular $h_i \text{Min}\{d(i, I) d(i, j)\}$.
5. Si $k = P$, el problema se detiene; el conjunto X_p es la solución para el algoritmo miope. Si $k < P$, ir al paso 2.

IV. Escenarios de solución y resultados

4.1 Presentación de las alternativas de solución

- a) Preparación del algoritmo
 - a-1) Definición del tiempo límite máximo de respuesta en función de la distancia de recorrido por el servicio de auxilio, considerando una velocidad de 80 km/hr.

Considerando la descripción física de la carretera, en particular los puntos de retorno para autos (nodos), se puede generar la *tabla 10*:

Tabla 10. Nodos existentes en la carretera México – Puebla.

Nodo	Kilometraje	Kilometraje en decimales	Arco M-P	Longitud [km]	Arco P-M	Longitud [km]
A	05+000	05.000				
B	30+000	30.000	J _{A-B}	25.000	J _{V-W}	25.000
C	39+000	39.000	J _{B-C}	09.000	J _{U-V}	09.000
D	47+000	47.000	J _{C-D}	08.000	J _{T-U}	08.000
E	56+000	56.000	J _{D-E}	09.000	J _{S-T}	09.000
F	63+000	63.000	J _{E-F}	07.000	J _{R-S}	07.000
G	73+000	73.000	J _{F-G}	10.000	J _{Q-R}	10.000
H	75+000	75.000	J _{G-H}	02.000	J _{P-Q}	02.000
I	92+000	92.000	J _{H-I}	17.000	J _{O-P}	17.000
J	101+000	101.000	J _{I-J}	09.000	J _{N-O}	09.000
K	108+000	108.000	J _{J-K}	07.000	J _{N-Ñ}	07.000
L	111+000	111.000	J _{K-L}	03.000	J _{M-N}	03.000

Se puede observar que el arco sencillo más largo mide 25.000 km, de tal manera que, recorrerlo a una velocidad $v=80$ [km/h], toma 18 [min] 45 [seg], lo cual queda dentro de lo que se sugiere para el diseño de los Servicios de Emergencia Médica.

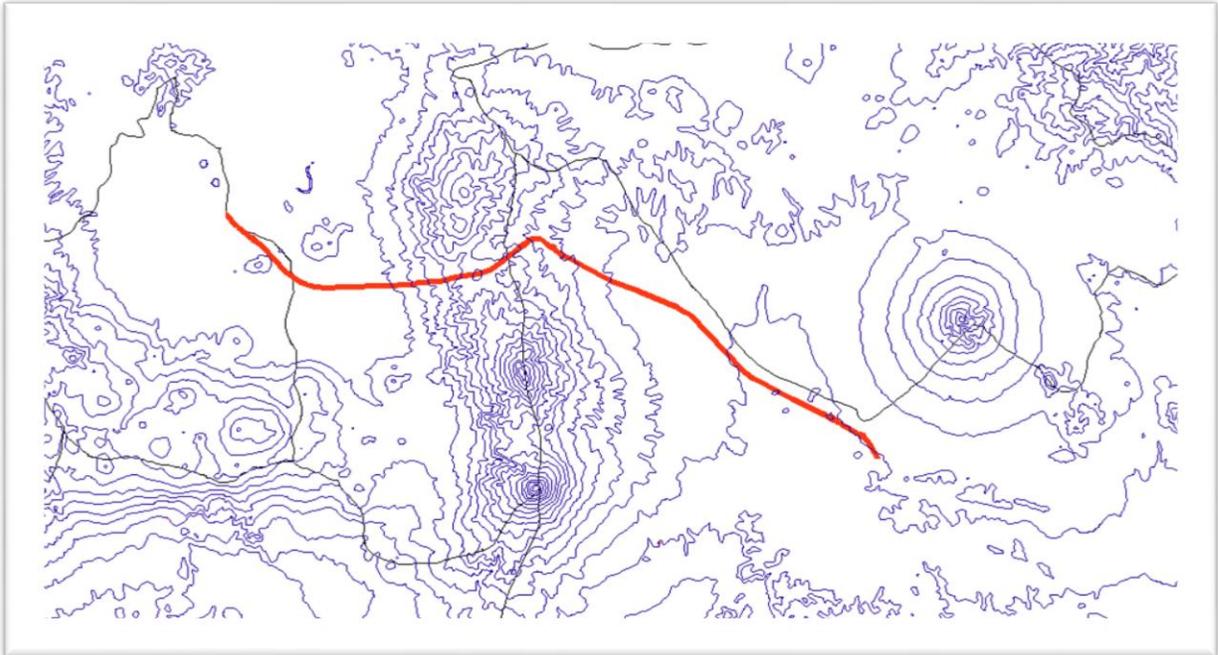
$$t_{ct} = \frac{l_{ct}}{v} = \frac{25[km]}{80 \left[\frac{km}{h} \right]} = 0.3125[hr] = 18 [min] 45[seg]$$

Cabe señalar que el número de instalaciones a localizar será de doce servicios, es decir, P=10.

b) Determinación del sentido del accidente.

Debido a que no existen registros de los accidentes especificando en qué sentido de la autopista ocurren, con datos como pendientes peligrosas, curvas, clima, entre otros, se determinó el sentido del accidente.

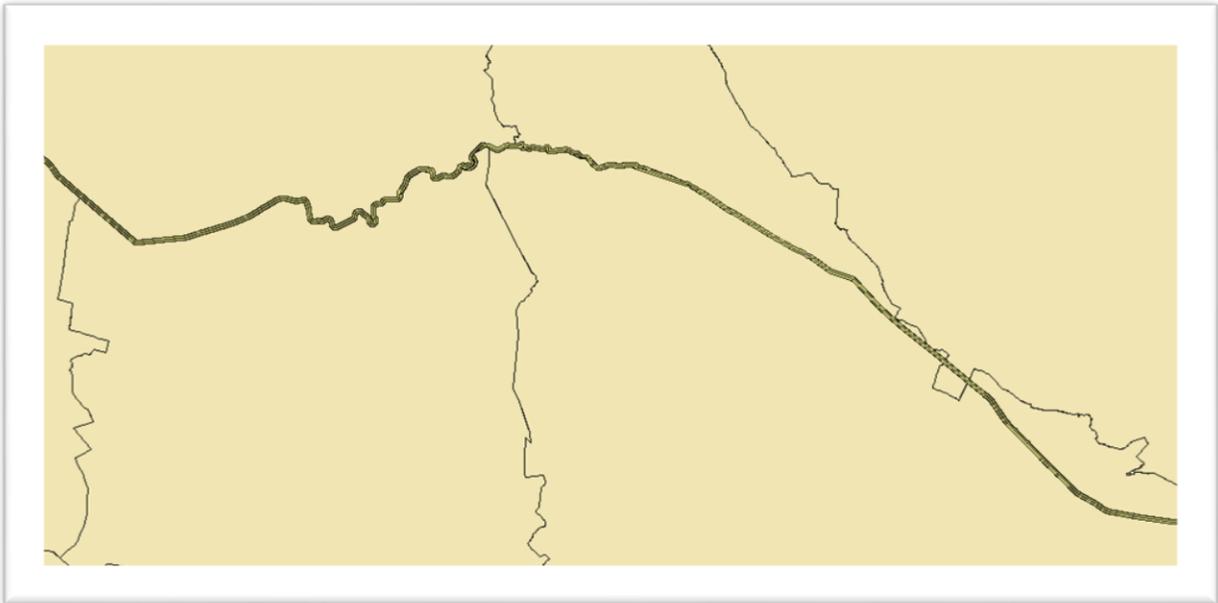
Figura 11¹. Curvas de nivel que atraviesa la carretera México - Puebla.



Con el trazo de las curvas de nivel se puede determinar que la carretera asciende del kilómetro 0+000 al 56+000 y desciende del kilómetro 57+000 al 95+000.

¹ CONABIO (1998).

Figura 12². Carretera de cuota México – Puebla.



En la figura 10 se observa el trazo de la carretera y las diferentes curvas que presenta, desde el kilómetro 56+000 hasta el 69+000.

c) Inicialización del algoritmo.

² IMT (2007).

Tabla 11. Matriz de distancias, en kilómetros

		MATRIZ DE DISTANCIAS [Km]																						
Destino \ Origen	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
A	0	25	34	42	51	58	68	70	87	96	103	106	107	104	97	88	71	69	59	52	43	35	26	1
B	27	0	9	17	26	33	43	45	62	71	78	81	82	79	72	63	46	44	34	27	18	10	1	26
C	36	11	0	8	17	24	34	36	53	62	69	72	73	70	63	54	37	44	25	18	9	1	10	35
D	44	19	10	0	9	16	26	28	45	54	61	64	65	62	55	46	29	27	17	10	1	9	18	43
E	53	28	19	11	0	7	17	19	36	45	52	55	56	53	46	37	20	18	8	1	10	18	27	52
F	60	35	26	18	9	0	10	12	29	38	45	48	49	46	39	30	13	11	1	8	17	25	34	59
G	70	45	36	28	19	12	0	2	19	28	35	38	39	36	29	20	3	1	11	18	27	35	44	69
H	72	47	38	30	21	14	4	0	17	26	33	36	37	34	27	18	1	3	13	20	29	37	46	71
I	89	64	55	47	38	31	21	19	0	9	16	19	20	17	10	1	18	20	30	37	46	54	63	88
J	98	73	64	56	47	40	30	28	11	0	7	10	11	8	1	10	27	29	39	46	55	63	72	97
K	105	80	71	63	54	47	37	35	18	9	0	3	4	1	8	17	34	36	46	53	62	70	79	104
L	108	83	74	66	57	50	40	38	21	12	5	0	1	4	11	20	37	39	49	56	65	73	82	107
M	107	82	73	65	56	49	39	37	20	11	4	1	0	3	10	19	36	38	48	55	64	72	81	106
N	104	79	70	62	53	46	36	34	17	8	1	4	5	0	7	16	33	35	45	52	61	69	78	103
Ñ	97	72	63	55	46	39	29	27	10	1	8	11	12	9	0	9	26	28	38	45	54	62	71	96
O	88	63	54	46	37	30	20	18	1	10	17	20	21	18	11	0	17	19	29	36	45	53	62	87
P	71	46	37	29	20	13	3	1	18	27	34	37	38	35	28	19	0	2	12	19	28	36	45	70
Q	69	44	35	27	18	11	1	3	20	29	36	39	40	37	30	21	4	0	10	17	26	34	43	68
R	59	34	25	17	8	1	11	13	30	39	46	49	50	47	40	31	14	12	0	7	16	24	33	58
S	52	27	18	10	1	8	18	20	37	46	53	56	57	54	47	38	21	19	9	0	9	17	26	51
T	43	18	9	1	10	17	27	29	46	55	62	65	66	63	56	47	30	28	18	11	0	8	17	42
U	35	10	1	9	18	25	35	37	54	63	70	73	74	71	64	55	38	36	26	19	10	0	9	34
V	26	1	10	18	27	34	44	46	63	72	79	82	83	80	73	64	47	45	35	28	19	11	0	25
W	1	26	35	43	52	59	69	71	88	97	104	107	108	105	98	89	72	70	60	53	44	36	27	0

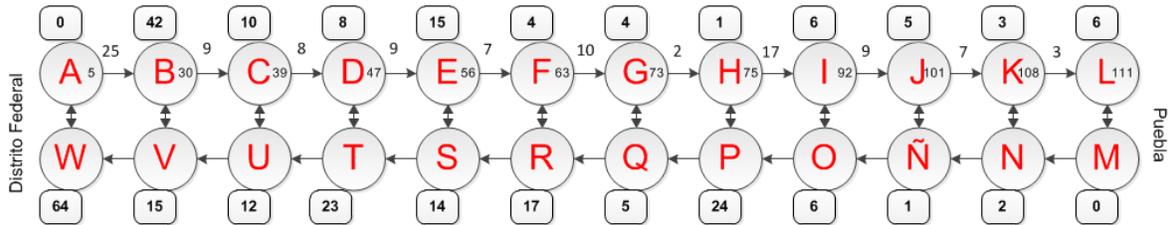
La demanda de accidentes está determinada de la siguiente manera:

NODO (M-P)	DEMANDA= h_i
A	0
B	42
C	10
D	8
E	15
F	4
G	4
H	1
I	6
J	5
K	3
L	6

NODO (P-M)	DEMANDA= h_i
M	0
N	2
Ñ	1
O	6
P	24
Q	5
R	17
S	14
T	23
U	12
V	15
W	64

Para ilustrar la red de distancias, se considera la red mostrada en la *figura 13*. Los números en recuadros, cerca de los nodos, son las demandas, h_i . La *tabla 11* muestra la matriz de distancias, dado en kilómetros; mientras que los valores de $h_i d_{ij}$ están dados por la *tabla 12*.

Figura 13. Red de distancias, en kilómetros, y demanda (número de accidentes).



Las operaciones para calcular la fila “B”, se desglosan de la siguiente forma:

De “B” a “A”: $(42 * 25) = 1050$

De “B” a “B”: $(42 * 0) = 0$

De “B” a “C”: $(42 * 9) = 378$

De “B” a “D”: $(42 * 9) + (42 * 8) = 714$

De “B” a “E”: $(42 * 9) + (42 * 8) + (42 * 9) = 1092$

De “B” a “F”: $(42 * 9) + (42 * 8) + (42 * 9) + (42 * 7) = 1386$

De “B” a “G”: $(42 * 9) + (42 * 8) + (42 * 9) + (42 * 7) + (42 * 10) = 1806$

De “B” a “H”: $(42 * 9) + (42 * 8) + (42 * 9) + (42 * 7) + (42 * 10) + (42 * 2) = 1890$

De “B” a “I”: $(42 * 9) + (42 * 8) + (42 * 9) + (42 * 7) + (42 * 10) + (42 * 2)$
 $+ (42 * 17) = 2604$

De “B” a “J”: $(42 * 9) + (42 * 8) + (42 * 9) + (42 * 7) + (42 * 10) + (42 * 2)$
 $+ (42 * 17) + (42 * 9) = 2982$

De “B” a “K”: $(42 * 9) + (42 * 8) + (42 * 9) + (42 * 7) + (42 * 10) + (42 * 2)$
 $+ (42 * 17) + (42 * 9) + (42 * 7) = 3276$

De “B” a “L”: $(42 * 9) + (42 * 8) + (42 * 9) + (42 * 7) + (42 * 10) + (42 * 2)$
 $+ (42 * 17) + (42 * 9) + (42 * 7) + (42 * 3) = 3402$

De “B” a “M”: $(42 * 9) + (42 * 8) + (42 * 9) + (42 * 7) + (42 * 10) + (42 * 2)$
 $+ (42 * 17) + (42 * 9) + (42 * 7) + (42 * 3) = 3402$

- De "B" a "N": $(42 * 9) + (42 * 8) + (42 * 9) + (42 * 7) + (42 * 10) + (42 * 2) + (42 * 17) + (42 * 9) + (42 * 7) = 3\ 276$
- De "B" a "Ñ": $(42 * 9) + (42 * 8) + (42 * 9) + (42 * 7) + (42 * 10) + (42 * 2) + (42 * 17) + (42 * 9) = 2\ 982$
- De "B" a "O": $(42 * 9) + (42 * 8) + (42 * 9) + (42 * 7) + (42 * 10) + (42 * 2) + (42 * 17) = 2\ 604$
- De "B" a "P": $(42 * 9) + (42 * 8) + (42 * 9) + (42 * 7) + (42 * 10) + (42 * 2) = 1\ 890$
- De "B" a "Q": $(42 * 9) + (42 * 8) + (42 * 9) + (42 * 7) + (42 * 10) = 1\ 806$
- De "B" a "R": $(42 * 9) + (42 * 8) + (42 * 9) + (42 * 7) = 1\ 386$
- De "B" a "S": $(42 * 9) + (42 * 8) + (42 * 9) = 1\ 092$
- De "B" a "T": $(42 * 9) + (42 * 8) = 714$
- De "B" a "U": $(42 * 9) = 378$
- De "B" a "V": $(42 * 0) = 0$
- De "B" a "W": $(42 * 25) = 1050$

De esta manera, la matriz de distancia por demanda queda como se muestra en la *tabla 12*.

Tabla 12. Matriz de h_{ij} .

		MATRIZ DE DISTANCIA POR DEMANDA																							
Origen	Destino	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
	A		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B		1050	0	378	714	1092	1386	1806	1890	2604	2982	3276	3402	3402	3276	2982	2604	1890	1806	1386	1092	714	378	0	1050
C		340	90	0	80	170	240	340	360	530	620	690	720	720	690	620	530	360	430	240	170	80	0	90	340
D		336	136	64	0	72	128	208	224	360	432	488	512	512	488	432	360	224	208	128	72	0	64	136	336
E		765	390	255	135	0	105	255	285	540	675	780	825	825	780	675	540	285	255	105	0	135	255	390	765
F		232	132	96	64	28	0	40	48	116	152	180	192	192	180	152	116	48	40	0	28	64	96	132	232
G		272	172	136	104	68	40	0	8	76	112	140	152	152	140	112	76	8	0	40	68	104	136	172	272
H		70	45	36	28	19	12	2	0	17	26	33	36	36	33	26	17	0	2	12	19	28	36	45	70
I		522	372	318	270	216	174	114	102	0	54	96	114	114	96	54	0	102	114	174	216	270	318	372	522
J		480	355	310	270	225	190	140	130	45	0	35	50	50	35	0	45	130	140	190	225	270	310	355	480
K		309	234	207	183	156	135	105	99	48	21	0	9	9	0	21	48	99	105	135	156	183	207	234	309
L		636	486	432	384	330	288	228	216	114	60	18	0	0	18	60	114	216	228	288	330	384	432	486	636
M		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N		206	156	138	122	104	90	70	66	32	14	0	6	6	0	14	32	66	70	90	104	122	138	156	206
Ñ		96	71	62	54	45	38	28	26	9	0	7	10	10	7	0	9	26	28	38	45	54	62	71	96
O		522	372	318	270	216	174	114	102	0	54	96	114	114	96	54	0	102	114	174	216	270	318	372	522
P		1680	1080	864	672	456	288	48	0	408	624	792	864	864	792	624	408	0	48	288	456	672	864	1080	1680
Q		340	215	170	130	85	50	0	10	95	140	175	190	190	175	140	95	10	0	50	85	130	170	215	340
R		986	561	408	272	119	0	170	204	493	646	765	816	816	765	646	493	204	170	0	119	272	408	561	986
S		714	364	238	126	0	98	238	266	504	630	728	770	770	728	630	504	266	238	98	0	126	238	364	714
T		966	391	184	0	207	368	598	644	1035	1242	1403	1472	1472	1403	1242	1035	644	598	368	207	0	184	391	966
U		408	108	0	96	204	288	408	432	636	744	828	864	864	828	744	636	432	408	288	204	96	0	108	408
V		375	0	135	255	390	495	645	675	930	1065	1170	1215	1215	1170	1065	930	675	645	495	390	255	135	0	375
W		0	1600	2176	2688	3264	3712	4352	4480	5568	6144	6592	6784	6784	6592	6144	5568	4480	4352	3712	3264	2688	2176	1600	0

PRIMERA ITERACIÓN

B-1) Iniciar con $k = 0$,

B-2) Incrementar k , sea $k = 1$

B-3) Calcular $Z_j^k = \sum_i h_i d(i, j \cup X_{k-1})$

Tabla 13. Matriz de distancia por demanda, con Z_j^1 calculada.

		MATRIZ DE DISTANCIA POR DEMANDA																							
Destino	Origen	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
A	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	A	1050	0	378	714	1092	1386	1806	1890	2604	2982	3276	3402	3402	3276	2982	2604	1890	1806	1386	1092	714	378	0	1050
C	A	340	90	0	80	170	240	340	360	530	620	690	720	720	690	620	530	360	430	240	170	80	0	90	340
D	A	336	136	64	0	72	128	208	224	360	432	488	512	512	488	432	360	224	208	128	72	0	64	136	336
E	A	765	390	255	135	0	105	255	285	540	675	780	825	825	780	675	540	285	255	105	0	135	255	390	765
F	A	232	132	96	64	28	0	40	48	116	152	180	192	192	180	152	116	48	40	0	28	64	96	132	232
G	A	272	172	136	104	68	40	0	8	76	112	140	152	152	140	112	76	8	0	40	68	104	136	172	272
H	A	70	45	36	28	19	12	2	0	17	26	33	36	36	33	26	17	0	2	12	19	28	36	45	70
I	A	522	372	318	270	216	174	114	102	0	54	96	114	114	96	54	0	102	114	174	216	270	318	372	522
J	A	480	355	310	270	225	190	140	130	45	0	35	50	50	35	0	45	130	140	190	225	270	310	355	480
K	A	309	234	207	183	156	135	105	99	48	21	0	9	9	0	21	48	99	105	135	156	183	207	234	309
L	A	636	486	432	384	330	288	228	216	114	60	18	0	18	60	114	216	228	288	330	384	432	486	636	
M	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N	A	206	156	138	122	104	90	70	66	32	14	0	6	6	0	14	32	66	70	90	104	122	138	156	206
Ñ	A	96	71	62	54	45	38	28	26	9	0	7	10	10	7	0	9	26	28	38	45	54	62	71	96
O	A	522	372	318	270	216	174	114	102	0	54	96	114	114	96	54	0	102	114	174	216	270	318	372	522
P	A	1680	1080	864	672	456	288	48	0	408	624	792	864	864	792	624	408	0	48	288	456	672	864	1080	1680
Q	A	340	215	170	130	85	50	0	10	95	140	175	190	190	175	140	95	10	0	50	85	130	170	215	340
R	A	986	561	408	272	119	0	170	204	493	646	765	816	816	765	646	493	204	170	0	119	272	408	561	986
S	A	714	364	238	126	0	98	238	266	504	630	728	770	770	728	630	504	266	238	98	0	126	238	364	714
T	A	966	391	184	0	207	368	598	644	1035	1242	1403	1472	1472	1403	1242	1035	644	598	368	207	0	184	391	966
U	A	408	108	0	96	204	288	408	432	636	744	828	864	864	828	744	636	432	408	288	204	96	0	108	408
V	A	375	0	135	255	390	495	645	675	930	1065	1170	1215	1215	1170	1065	930	675	645	495	390	255	135	0	375
W	A	0	1600	2176	2688	3264	3712	4352	4480	5568	6144	6592	6784	6784	6592	6144	5568	4480	4352	3712	3264	2688	2176	1600	0
TOTAL		11305	7330	6925	6917	7466	8299	9909	10267	14160	16437	18292	19117	19117	18292	16437	14160	10267	9999	8299	7466	6917	6925	7330	11305

Sumando las entradas de cada columna, en la *tabla 13*, se obtienen los valores de Z_j^1 .

Tabla 14. Matriz de distancia por demanda. El valor más pequeño de Z_j^1 se muestra en la fila “TOTAL” en letra negra.

		MATRIZ DE DISTANCIA POR DEMANDA																							
Destino	Origen	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
A	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	A	1050	0	378	714	1092	1386	1806	1890	2604	2982	3276	3402	3402	3276	2982	2604	1890	1806	1386	1092	714	378	0	1050
C	A	340	90	0	80	170	240	340	360	530	620	690	720	720	690	620	530	360	430	240	170	80	0	90	340
D	A	336	136	64	0	72	128	208	224	360	432	488	512	512	488	432	360	224	208	128	72	0	64	136	336
E	A	765	390	255	135	0	105	255	285	540	675	780	825	825	780	675	540	285	255	105	0	135	255	390	765
F	A	232	132	96	64	28	0	40	48	116	152	180	192	192	180	152	116	48	40	0	28	64	96	132	232
G	A	272	172	136	104	68	40	0	8	76	112	140	152	152	140	112	76	8	0	40	68	104	136	172	272
H	A	70	45	36	28	19	12	2	0	17	26	33	36	36	33	26	17	0	2	12	19	28	36	45	70
I	A	522	372	318	270	216	174	114	102	0	54	96	114	114	96	54	0	102	114	174	216	270	318	372	522
J	A	480	355	310	270	225	190	140	130	45	0	35	50	50	35	0	45	130	140	190	225	270	310	355	480
K	A	309	234	207	183	156	135	105	99	48	21	0	9	9	0	21	48	99	105	135	156	183	207	234	309
L	A	636	486	432	384	330	288	228	216	114	60	18	0	0	18	60	114	216	228	288	330	384	432	486	636
M	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N	A	206	156	138	122	104	90	70	66	32	14	0	6	6	0	14	32	66	70	90	104	122	138	156	206
Ñ	A	96	71	62	54	45	38	28	26	9	0	7	10	10	7	0	9	26	28	38	45	54	62	71	96
O	A	522	372	318	270	216	174	114	102	0	54	96	114	114	96	54	0	102	114	174	216	270	318	372	522
P	A	1680	1080	864	672	456	288	48	0	408	624	792	864	864	792	624	408	0	48	288	456	672	864	1080	1680
Q	A	340	215	170	130	85	50	0	10	95	140	175	190	190	175	140	95	10	0	50	85	130	170	215	340
R	A	986	561	408	272	119	0	170	204	493	646	765	816	816	765	646	493	204	170	0	119	272	408	561	986
S	A	714	364	238	126	0	98	238	266	504	630	728	770	770	728	630	504	266	238	98	0	126	238	364	714
T	A	966	391	184	0	207	368	598	644	1035	1242	1403	1472	1472	1403	1242	1035	644	598	368	207	0	184	391	966
U	A	408	108	0	96	204	288	408	432	636	744	828	864	864	828	744	636	432	408	288	204	96	0	108	408
V	A	375	0	135	255	390	495	645	675	930	1065	1170	1215	1215	1170	1065	930	675	645	495	390	255	135	0	375
W	A	0	1600	2176	2688	3264	3712	4352	4480	5568	6144	6592	6784	6784	6592	6144	5568	4480	4352	3712	3264	2688	2176	1600	0
TOTAL		11305	7330	6925	6917	7466	8299	9909	10267	14160	16437	18292	19117	19117	18292	16437	14160	10267	9999	8299	7466	6917	6925	7330	11305

B-4) El valor más pequeño de Z_j^1 , es decir, el nodo $j^*(k)$ que minimiza Z_j^k , esto es $j^*(k) = \arg \min_j \{Z_j^k\}$, corresponde a $j = D = T$, con valor de 6 917, como se muestra en la *tabla 14*.

Calculando $h_i \text{Min}\{d(i,I)d(i,j)\}$, se obtiene la *tabla 15*.

Tabla 15. Matriz de distancia por demanda con el valor mínimo para cada renglón-columna.

Destino Origen	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	714	0	378	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	378	0	714
C	80	80	0	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	0	80	80
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	135	135	135	135	0	105	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	105	0	135	135	135	135
F	64	64	64	64	28	0	40	48	64	64	64	64	64	64	64	64	48	40	0	28	64	64	64	64
G	104	104	104	104	68	40	0	8	76	104	104	104	104	104	104	76	8	0	40	68	104	104	104	104
H	28	28	28	28	19	12	2	0	17	26	28	28	28	28	26	17	0	2	12	19	28	28	28	28
I	270	270	270	270	216	174	114	102	0	54	96	114	114	96	54	0	102	114	174	216	270	270	270	270
J	270	270	270	270	225	190	140	130	45	0	35	50	50	35	0	45	130	140	190	225	270	270	270	270
K	183	183	183	183	156	135	105	99	48	21	0	9	9	0	21	48	99	105	135	156	183	183	183	183
L	384	384	384	384	330	288	228	216	114	60	18	0	0	18	60	114	216	228	288	330	384	384	384	384
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N	122	122	122	122	104	90	70	66	32	14	0	6	6	0	14	32	66	70	90	104	122	122	122	122
Ñ	54	54	54	54	45	38	28	26	9	0	7	10	10	7	0	9	26	28	38	45	54	54	54	54
O	270	270	270	270	216	174	114	102	0	54	96	114	114	96	54	0	102	114	174	216	270	270	270	270
P	672	672	672	672	456	288	48	0	408	624	672	672	672	672	624	408	0	48	288	456	672	672	672	672
Q	130	130	130	130	85	50	0	10	95	130	130	130	130	130	95	10	0	50	85	130	130	130	130	130
R	272	272	272	272	119	0	170	204	272	272	272	272	272	272	272	272	204	170	0	119	272	272	272	272
S	126	126	126	126	0	98	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	98	0	126	126	126	126
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U	96	96	0	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	0	96	96
V	255	0	135	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	135	0	255
W	0	1600	2176	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2688	2176	1600	0
TOTAL	4229	4860	5773	6917	5900	5515	5153	5105	5274	5517	5616	5667	5667	5616	5517	5274	5105	5153	5515	5900	6917	5773	4860	4229

Así que, el óptimo de la demanda de distancia ponderada total si se localiza únicamente una mediana para la red de la *figura 11*, resulta una distancia promedio de $\frac{6917}{287} = 24.10$ kilómetros. (Nótese que hay 287 demandas en la red).

B-5) Pero como $(k = 1) < P$, ir nuevamente al paso B2

SEGUNDA ITERACIÓN

B-2) Incrementar k, ahora k=2.

B-3) Calcular $Z_j^k = \sum_i h_i d(i, j \cup X_{k-1})$

B-4) Para localizar una segunda mediana, se requiere calcular la matriz $h_i \cdot \min\{d(i, D); d(i, j)\}$ para cada nodo/sitio candidato (i, j) .

Sumando las entradas de cada columna, en la *tabla 16*, se obtienen los valores de Z_j^2 . El valor del nodo $j^*(k)$ que minimiza Z_j^k corresponde a $j = A = W$, con valor de 4 229.

Calculando $h_i \cdot \min\{d(i, I) d(i, j)\}$, se obtiene la tabla 16.

Tabla 16. Matriz de $h_i d_{i2}$.

		MATRIZ DE DISTANCIA POR DEMANDA																							
Destino Origen	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
B	714	0	378	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	378	0	714
C	80	80	0	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	0	80
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	135	135	135	135	0	105	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	105	0	135	135	135	135	
F	64	64	64	64	28	0	40	48	64	64	64	64	64	64	64	64	48	40	0	28	64	64	64	64	
G	104	104	104	104	68	40	0	8	76	104	104	104	104	104	104	76	8	0	40	68	104	104	104	104	
H	28	28	28	28	19	12	2	0	17	26	28	28	28	28	26	17	0	2	12	19	28	28	28	28	
I	270	270	270	270	216	174	114	102	0	54	96	114	114	96	54	0	102	114	174	216	270	270	270	270	
J	270	270	270	270	225	190	140	130	45	0	35	50	50	35	0	45	130	140	190	225	270	270	270	270	
K	183	183	183	183	156	135	105	99	48	21	0	9	9	0	21	48	99	105	135	156	183	183	183	183	
L	384	384	384	384	330	288	228	216	114	60	18	0	0	18	60	114	216	228	288	330	384	384	384	384	
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
N	122	122	122	122	104	90	70	66	32	14	0	6	6	0	14	32	66	70	90	104	122	122	122	122	
Ñ	54	54	54	54	45	38	28	26	9	0	7	10	10	7	0	9	26	28	38	45	54	54	54	54	
O	270	270	270	270	216	174	114	102	0	54	96	114	114	96	54	0	102	114	174	216	270	270	270	270	
P	672	672	672	672	456	288	48	0	408	624	672	672	672	672	624	408	0	48	288	456	672	672	672	672	
Q	130	130	130	130	85	50	0	10	95	130	130	130	130	130	95	10	0	50	85	130	130	130	130	130	
R	272	272	272	272	219	0	170	204	272	272	272	272	272	272	272	272	204	170	0	219	272	272	272	272	
S	126	126	126	126	0	98	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	98	0	126	126	126	126	126	
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
U	96	96	0	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	0	96	
V	255	0	135	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	135	0	255	
W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TOTAL	4229	3260	3597	4229	3212	2827	2465	2417	2586	2829	2928	2979	2979	2928	2829	2586	2417	2465	2827	3212	4229	3597	3260	4229	

B-5) Debido a que $(k = 2) < P$, ir nuevamente al paso B2

TERCERA ITERACIÓN

B-2) Incrementar k, ahora k=3.

B-3) Calcular $Z_j^k = \sum_i h_i d(i, j \cup X_{k-1})$

B-4) Para localizar una tercera mediana, se requiere calcular la matriz $h_i \cdot \min\{d(i, A); d(i, j)\}$ para cada nodo/sitio candidato (i, j) .

Sumando las entradas de cada columna, en la *tabla 17*, se obtienen los valores de Z_j^3 . El valor del nodo $j^*(k)$ que minimiza Z_j^k corresponde a $j = H = P$, con valor de 2 417.

Tabla 17. Matriz de $h_i d_{i3}$.

		MATRIZ DE DISTANCIA POR DEMANDA																							
Destino \ Origen	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
B	714	0	378	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	378	0	714
C	80	80	0	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	0	80	80
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	135	135	135	135	0	105	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	105	0	135	135	135	135	
F	48	48	48	48	28	0	40	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	40	0	28	48	48	48	48	
G	8	8	8	8	8	8	0	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	0	8	8	8	8	8	8	
H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
I	102	102	102	102	102	102	102	102	0	54	96	102	102	96	54	0	102	102	102	102	102	102	102	102	
J	130	130	130	130	130	130	130	130	45	0	35	50	50	35	0	45	130	130	130	130	130	130	130	130	
K	99	99	99	99	99	99	99	99	48	21	0	9	9	0	21	48	99	99	99	99	99	99	99	99	
L	216	216	216	216	216	216	216	216	114	60	18	0	0	18	60	114	216	216	216	216	216	216	216	216	
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
N	66	66	66	66	66	66	66	66	32	14	0	6	6	0	14	32	66	66	66	66	66	66	66	66	
Ñ	26	26	26	26	26	26	26	26	9	0	7	10	10	7	0	9	26	26	26	26	26	26	26	26	
O	102	102	102	102	102	102	102	102	0	54	96	102	102	96	54	0	102	102	102	102	102	102	102	102	
P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Q	10	10	10	10	10	10	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	10	10	10	10	10	10	
R	204	204	204	204	119	0	170	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	170	0	119	204	204	204	204	
S	126	126	126	126	0	98	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	98	0	126	126	126	126		
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
U	96	96	0	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	0	96	
V	255	0	135	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	135	0	255	
W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TOTAL	2417	1448	1785	2417	2051	2107	2357	2417	1924	1879	1928	1955	1955	1928	1879	1924	2417	2357	2107	2051	2417	1785	1448	2417	

B-5) Debido a que $(k = 3) < P$, ir nuevamente al paso B2

CUARTA ITERACIÓN

B-2) Incrementar k, ahora k=4.

B-3) Calcular $Z_j^k = \sum_i h_i d(i, j \cup X_{k-1})$

B-4) Para localizar una cuarta mediana, se requiere calcular la matriz

$$h_i \cdot \min\{d(i, H); d(i, j)\} \text{ para cada nodo/sitio candidato } (i, j).$$

Sumando las entradas de cada columna, en la *tabla 18*, se obtienen los valores de Z_j^4 . El valor del nodo $j^*(k)$ que minimiza Z_j^k corresponde a $j = B = V$, con valor de 1 448.

Tabla 18. Matriz de $h_i d_{i4}$.

		MATRIZ DE DISTANCIA POR DEMANDA																						
Origen \ Destino	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	80	80	0	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	135	135	135	135	0	105	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	105	0	135	135	135	135
F	48	48	48	48	28	0	40	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	40	0	28	48	48	48	
G	8	8	8	8	8	8	0	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
I	102	102	102	102	102	102	102	102	0	54	96	102	102	96	54	0	102	102	102	102	102	102	102	
J	130	130	130	130	130	130	130	130	45	0	35	50	50	35	0	45	130	130	130	130	130	130	130	
K	99	99	99	99	99	99	99	99	48	21	0	9	9	0	21	48	99	99	99	99	99	99	99	
L	216	216	216	216	216	216	216	216	114	60	18	0	0	18	60	114	216	216	216	216	216	216	216	
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
N	66	66	66	66	66	66	66	66	32	14	0	6	6	0	14	32	66	66	66	66	66	66	66	
Ñ	26	26	26	26	26	26	26	26	9	0	7	10	10	7	0	9	26	26	26	26	26	26	26	
O	102	102	102	102	102	102	102	102	0	54	96	102	102	96	54	0	102	102	102	102	102	102	102	
P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Q	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
R	204	204	204	204	119	0	170	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204	170	0	119	204	204	204	
S	126	126	126	126	0	98	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	98	0	126	126	126	
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
U	96	96	0	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TOTAL	1448	1448	1272	1448	1082	1138	1388	1448	955	910	959	986	986	959	910	955	1448	1388	1138	1082	1448	1272	1448	

B-5) Debido a que $(k = 4) < P$, ir nuevamente al paso B2

QUINTA ITERACIÓN

B-2) Incrementar k , ahora $k=5$.

B-3) Calcular $Z_j^k = \sum_i h_i d(i, j \cup X_{k-1})$

B-4) Para localizar una quinta mediana, se requiere calcular la matriz $h_i \cdot \min\{d(i, B); d(i, j)\}$ para cada nodo/sitio candidato (i, j) .

Sumando las entradas de cada columna, en la *tabla 19*, se obtienen los valores de Z_j^5 . El valor del nodo $j^*(k)$ que minimiza Z_j^k corresponde a $j = J = \tilde{N}$, con valor de 910.

Tabla 19. Matriz de $h_i d_{i5}$.

		MATRIZ DE DISTANCIA POR DEMANDA																							
Destino	Origen	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
A	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	A	80	80	0	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
D	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	A	135	135	135	135	0	105	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	105	0	135	135	135	135
F	A	48	48	48	48	28	0	40	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	40	0	28	48	48	48	48
G	A	8	8	8	8	8	8	0	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	0	8	8	8	8	8
H	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	A	54	54	54	54	54	54	54	54	0	54	54	54	54	54	54	54	0	54	54	54	54	54	54	54
J	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K	A	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	0	9	9	0	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
L	A	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	18	0	0	18	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
M	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N	A	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	0	6	6	0	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Ñ	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O	A	54	54	54	54	54	54	54	54	0	54	54	54	54	54	54	54	0	54	54	54	54	54	54	54
P	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q	A	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
R	A	204	204	204	204	119	0	170	204	204	204	204	204	204	204	204	204	170	0	119	204	204	204	204	204
S	A	126	126	126	126	0	98	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	98	0	126	126	126	126
T	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U	A	96	96	0	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96
V	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL		910	910	734	910	544	600	850	910	802	910	833	830	830	833	910	802	910	850	600	544	910	734	910	910

B-5) Debido a que $(k = 5) < P$, ir nuevamente al paso B2

SEXTA ITERACIÓN

B-2) Incrementar k, ahora k=6.

B-3) Calcular $Z_j^k = \sum_i h_i d(i, j \cup X_{k-1})$

B-4) Para localizar una sexta mediana, se requiere calcular la matriz $h_i \cdot \min\{d(i, J); d(i, j)\}$ para cada nodo/sitio candidato (i, j) .

Sumando las entradas de cada columna, en la *tabla 20*, se obtienen los valores de Z_j^6 . El valor del nodo $j^*(k)$ que minimiza Z_j^k corresponde a $j = E = S$, con valor de 544.

Tabla 20. Matriz de $h_i d_{i6}$.

		MATRIZ DE DISTANCIA POR DEMANDA																							
Destino	Origen	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
A	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	A	80	80	0	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
D	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	A	28	28	28	28	28	0	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	0	28	28	28	28
G	A	8	8	8	8	8	8	0	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
H	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	A	54	54	54	54	54	54	54	0	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
J	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K	A	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	0	9	9	0	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
L	A	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	18	0	0	18	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
M	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N	A	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	0	6	6	0	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Ñ	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O	A	54	54	54	54	54	54	54	0	54	54	54	54	54	54	54	0	54	54	54	54	54	54	54	54
P	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q	A	10	10	10	10	10	10	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
R	A	119	119	119	119	119	0	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	0	119	119	119	119
S	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U	A	96	96	0	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96
V	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL		544	544	368	544	544	397	526	544	436	544	467	464	464	467	544	436	544	526	397	544	544	368	544	544

B-5) Debido a que $(k = 6) < P$, ir nuevamente al paso B2

SÉPTIMA ITERACIÓN

B-2) Incrementar k , ahora $k=7$.

B-3) Calcular $Z_j^k = \sum_i h_i d(i, j \cup X_{k-1})$

B-4) Para localizar una séptima mediana, se requiere calcular la matriz $h_i \cdot \min\{d(i, E); d(i, j)\}$ para cada nodo/sitio candidato (i, j) .

Sumando las entradas de cada columna, en la *tabla 21*, se obtienen los valores de Z_j^7 . El valor del nodo $j^*(k)$ que minimiza Z_j^k corresponde a $j = C = U$, con valor de 368.

Tabla 21. Matriz de $h_i d_{i7}$.

		MATRIZ DE DISTANCIA POR DEMANDA																							
Destino	Origen	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
A	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	A	28	28	28	28	28	0	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	0	28	28	28	28	28
G	A	8	8	8	8	8	8	0	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
H	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	A	54	54	54	54	54	54	54	0	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
J	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K	A	21	21	21	21	21	21	21	21	21	0	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
L	A	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	18	0	0	18	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
M	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N	A	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	0	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Ñ	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O	A	54	54	54	54	54	54	54	54	0	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
P	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q	A	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
R	A	119	119	119	119	119	0	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	0	119	119	119	119
S	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL		368	368	368	368	368	221	350	368	260	368	291	288	288	291	368	260	368	350	221	368	368	368	368	368

B-5) Debido a que $(k = 7) < P$, ir nuevamente al paso B2

OCTAVA ITERACIÓN

B-2) Incrementar k, ahora k=8.

B-3) Calcular $Z_j^k = \sum_i h_i d(i, j \cup X_{k-1})$

B-4) Para localizar una octava mediana, se requiere calcular la matriz $h_i \cdot \min\{d(i, C); d(i, j)\}$ para cada nodo/sitio candidato (i, j) .

Sumando las entradas de cada columna, en la *tabla 22*, se obtienen los valores de Z_j^8 . El valor del nodo $j^*(k)$ que minimiza Z_j^k corresponde a $j = F = R$, con valor de 221.

Tabla 22. Matriz de $h_i d_{i8}$.

		MATRIZ DE DISTANCIA POR DEMANDA																							
Destino	Origen	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
A	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G	A	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
H	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	A	54	54	54	54	54	54	54	54	0	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
J	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K	A	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	0	9	9	0	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
L	A	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	18	0	0	18	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
M	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N	A	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	0	6	6	0	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Ñ	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O	A	54	54	54	54	54	54	54	54	0	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
P	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q	A	10	10	10	10	10	10	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
R	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL		221	221	221	221	221	221	203	221	113	221	144	141	141	144	221	113	221	203	221	221	221	221	221	221

B-5) Debido a que $(k = 8) < P$, ir nuevamente al paso B2

NOVENA ITERACIÓN

B-2) Incrementar k , ahora $k=9$.

B-3) Calcular $Z_j^k = \sum_i h_i d(i, j \cup X_{k-1})$

B-4) Para localizar una novena mediana, se requiere calcular la matriz $h_i \cdot \min\{d(i, E); d(i, j)\}$ para cada nodo/sitio candidato (i, j) .

Sumando las entradas de cada columna, en la *tabla 23*, se obtienen los valores de Z_j^9 . El valor del nodo $j^*(k)$ que minimiza Z_j^k corresponde a $j = I = O$, con valor de 222.

Tabla 23. Matriz de $h_i d_{i9}$.

		MATRIZ DE DISTANCIA POR DEMANDA																							
Destino	Origen	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
A	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G	A	8	8	8	8	8	8	0	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
H	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
J	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K	A	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	0	9	9	0	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
L	A	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	18	0	0	18	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
M	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
N	A	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	0	6	6	0	14	14	14	14	14	14	14	14	14	
Ñ	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
O	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
P	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Q	A	10	10	10	10	10	10	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
R	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
T	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
U	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
V	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
W	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TOTAL		113	113	113	113	113	113	95	113	113	113	36	33	33	36	113	113	113	95	113	113	113	113	113	

B-5) Debido a que $(k = 9) < P$, ir nuevamente al paso B2

DÉCIMA ITERACIÓN

B-2) Incrementar k, ahora $k=10$.

B-3) Calcular $Z_j^k = \sum_i h_i d(i, j \cup X_{k-1})$

B-4) Para localizar una novena mediana, se requiere calcular la matriz $h_i \cdot \min\{d(i, C); d(i, j)\}$ para cada nodo/sitio candidato (i, j) .

Sumando las entradas de cada columna, en la *tabla 24*, se obtienen los valores de Z_j^{10} . El valor del nodo $j^*(k)$ que minimiza Z_j^k corresponde a $j = L = M$, con valor de 33.

Tabla 24. Matriz de $h_{i,d_{20}}$.

		MATRIZ DE DISTANCIA POR DEMANDA																							
Destino	Origen	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
A	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G	A	8	8	8	8	8	8	0	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	0	8	8	8	8	8	8
H	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
J	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K	A	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	0	9	9	0	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
L	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N	A	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0	6	6	0	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Ñ	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q	A	10	10	10	10	10	10	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
R	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL		33	33	33	33	33	33	15	33	33	33	18	33	33	18	33	33	33	15	33	33	33	33	33	33

B-5) Debido a que $(k = 10) = P$, fin del algoritmo.

4.2 Resultados obtenidos con la aplicación del algoritmo a la autopista México – Puebla.

Figura 14. Esquema de red de la autopista México – Puebla con servicios de auxilio vial seleccionados por el algoritmo en comparación con los existentes.

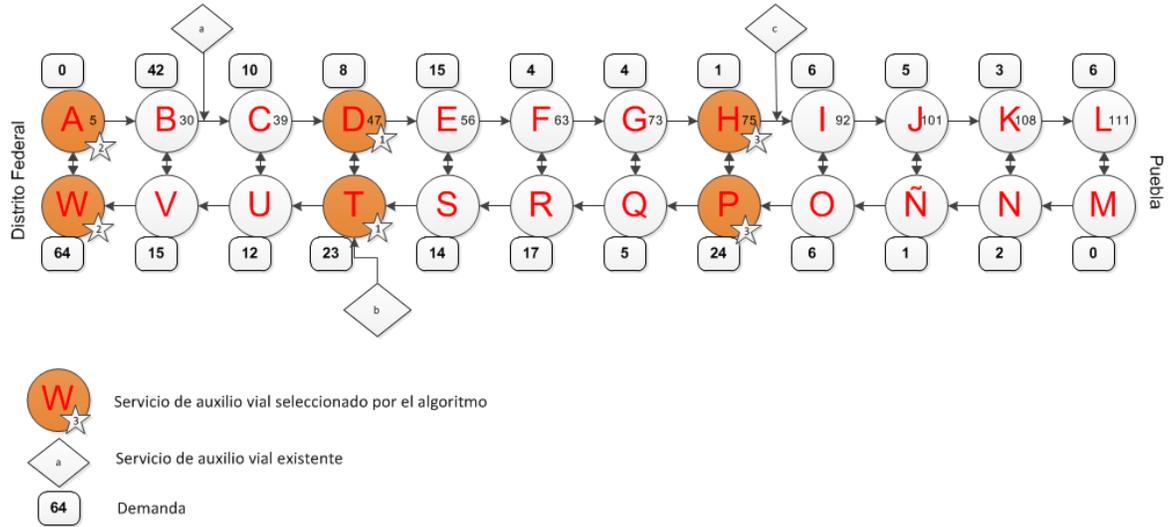


Tabla 25. Instalaciones seleccionadas por el algoritmo.

Número de servicio	Localización	Demanda de la distancia ponderada total	Distancia promedio [km]
1	D, T	6917	26.4
2	A, W	4229	26.4
3	H, P	2417	26.4

Si una ambulancia en promedio, viaja a una velocidad de $v=80$ [km/h] y, tomando en cuenta que el tiempo que se sugiere para el diseño de los servicios de emergencia médica es de 30 minutos = 0.5 horas, pero considerando que el tiempo efectivo es de 20 minutos, es decir 0.33 horas, el primer nodo seleccionado (D ó T), sería capaz de atender hasta 26.4 km a su alrededor, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$l_{ct} = (t_{ct})(v) = (0.33[hr]) \left(80 \left[\frac{km}{h} \right] \right) = 26.4[km]$$

Es decir, los nodos: B, C, D, E, F, R, S, T, U, V.

Figura 15. Esquema de red de la autopista México – Puebla, primera instalación seleccionada.

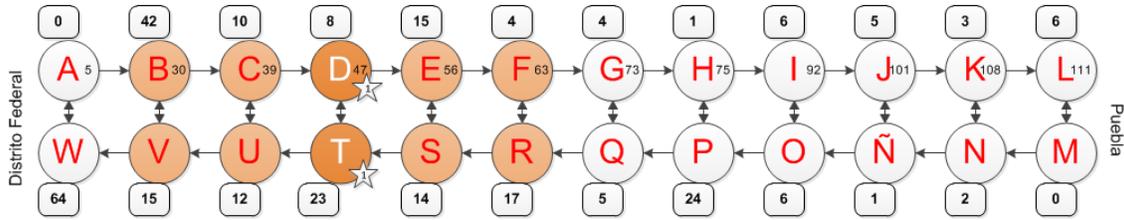


Tabla 26. Matriz de distancias de la primera instalación seleccionada, con 30 minutos de tiempo promedio de llegada.

		MATRIZ DE DISTANCIAS [Km]																							
		Destino																							
Origen		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
	D		44	19	10	0	9	16	26	28	45	54	61	64	65	62	55	46	29	27	17	10	1	9	18
T		43	18	9	1	10	17	27	29	46	55	62	65	66	63	56	47	30	28	18	11	0	8	17	42

En el caso del segundo nodo, A ó W, sería capaz de atender los nodos: A, B, V y W.

Figura 16. Esquema de red de la autopista México – Puebla, segunda instalación seleccionada.

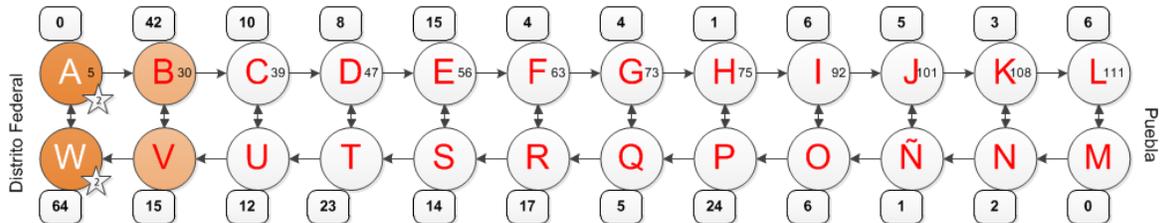


Tabla 27. Matriz de distancias de la segunda instalación seleccionada, con 30 minutos de tiempo promedio de llegada.

		MATRIZ DE DISTANCIAS [Km]																							
		Destino																							
Origen		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
	A		0	25	34	42	51	58	68	70	87	96	103	106	107	104	97	88	71	69	59	52	43	35	26
W		1	26	35	43	52	59	69	71	88	97	104	107	108	105	98	89	72	70	60	53	44	36	27	0

Para el tercer nodo, H ó P, se atenderían los nodos: E, F, G, H, I, J, O, P, Q, R y S.

Figura 17. Esquema de red de la autopista México – Puebla, tercera instalación seleccionada.

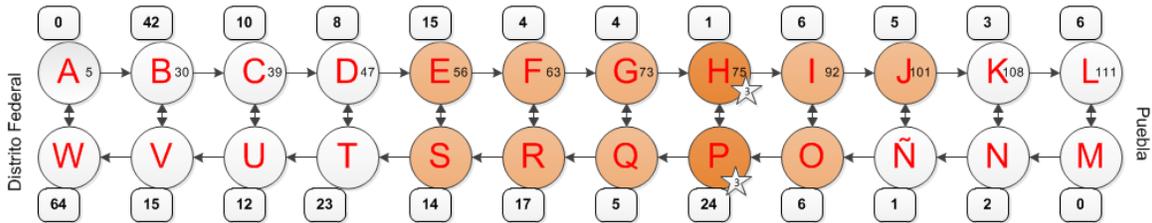


Tabla 28. Matriz de distancias de la tercera instalación seleccionada, con 30 minutos de tiempo promedio de llegada.

		MATRIZ DE DISTANCIAS [Km]																						
Origen \ Destino	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
	H	72	47	38	30	21	14	4	0	17	26	33	36	37	34	27	18	1	3	13	20	29	37	46
P	71	46	37	29	20	13	3	1	18	27	34	37	38	35	28	19	0	2	12	19	28	36	45	70

4.3 Solución óptima sugerida y recomendaciones

De tal manera, se tiene una cobertura de la siguiente manera:

Tabla 29. Cobertura de las tres instalaciones principales, seleccionadas por el algoritmo, con tiempo máximo de respuesta: 30 minutos.

Número	Localización	Demanda cubierta
1	D ó T	B, C, D, E, F, R, S, T, U, V
2	A ó W	A, B, V, W
3	H ó P	E, F, G, H, I, J, O, P, Q, R, S

Los nodos no cubiertos son: K, L, M, N, Ñ.

Se recomienda para etapa vacacional un aumento de servicios de auxilio vial temporales, como ejemplo, se podrían situar algunas ambulancias en los puntos marcados por el algoritmo, estos puntos son:

Tabla 30. Cobertura de la red, con tiempo máximo de respuesta: 30 minutos.

Número Medio	Localización	Demanda de la distancia ponderada total	Distancia promedio
4	B ó V	1448	5.04
5	J ó Ñ	910	3.17
6	E ó S	544	1.89
7	C ó U	368	1.28
8	F ó R	221	0.77
9	I ó O	222	0.77
10	L ó M	33	0.11
11	G ó Q	15	0.05
12	K ó N	0	0

En tal caso, el tiempo de respuesta para cada nodo, en lugar de 30 minutos, se tomarían 15 minutos (0.25 horas), ya que es en esta época cuando se tiene un aumento de accidentes y la respuesta debe ser más rápida. Es decir, con la misma velocidad, $v=80$ [km/h], el primer nodo seleccionado (D ó T), sería capaz de atender hasta 20 km a su alrededor:

$$l_{ct} = (t_{ct})(v) = (0.25[hr]) \left(80 \left[\frac{km}{h} \right] \right) = 20[km]$$

Atendiendo los nodos: B, C, D, E, F, R, S, T, U, V.

Tabla 31. Matriz de distancias obtenidas para la primera instalación, con 15 minutos de tiempo promedio de llegada.

		MATRIZ DE DISTANCIAS [Km]																							
		Destino																							
Origen		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
	D		44	19	10	0	9	16	26	28	45	54	61	64	65	62	55	46	29	27	17	10	1	9	18
T		43	18	9	1	10	17	27	29	46	55	62	65	66	63	56	47	30	28	18	11	0	8	17	42

De la misma manera para todos los nodos, la cobertura queda de la siguiente manera:

Tabla 32. Cobertura de la red, con tiempo máximo de respuesta: 15 minutos.

Número	Localización	Kilómetro (M-P)	Demanda cubierta
1	D ó T	47	B, C, D, E, F, R, S, T, U, V
2	A ó W	5	A, B, V, W
3	H ó P	75	E, F, G, H, I, J, O, P, Q, R, S
4	B ó V	30	B, C, D, T, U, V
5	J ó Ñ	101	I, J, K, L, M, N, Ñ, O
6	E ó S	56	C, D, E, F, G, H, P, Q, R, S, T, U
7	C ó U	39	B, C, D, E, S, T, U, V
8	F ó R	63	D, E, F, G, H, P, Q, R, S, T
9	I ó O	92	H, I, J, K, L, N, Ñ, O, P, Q
10	L ó M	111	J, K, L, M, N, Ñ, O
11	G ó Q	73	E, F, G, H, I, P, Q, R, S
12	K ó N	108	I, J, K, L, M, N, Ñ, O

V. CONCLUSIONES

Se ha realizado un análisis de la información sobre accidentes de vehículos de motor en carreteras y su impacto en la mortandad, considerándolos como la sexta causa de mortalidad en el país. Por esto, se ha propuesto una estrategia sencilla y de fácil implementación, para localizar servicios de emergencia en carreteras, para la atención oportuna de las personas accidentadas.

Los tres primeros puntos, encontrados por medio del algoritmo, se aproximan a la ubicación de los servicios de auxilio vial existentes. El existente en el kilómetro 33, se encuentra a 28.3 kilómetros del propuesto; mientras que el segundo propuesto coincide exactamente con el existente, en el kilómetro 47; para el tercer punto ubicado, se observa que, el servicio existente se encuentra en el kilómetro 90.8 y el propuesto en el kilómetro 75, lo que significa que tiene una diferencia de 15.8 kilómetros. Estas diferencias, entre las estaciones existentes y las propuestas, son muy significativas, ya que equivalen a 28.3 kilómetros en la primera ubicación y 15.8 kilómetros en la tercera ubicación, lo que en tiempo sería equivalente a 21 minutos 13 segundos y 11 minutos 51 segundos, respectivamente, tiempo extra que tendría que recorrer la ambulancia. Además, con este arreglo se observa que la carretera no se encuentra cubierta en su totalidad, para que esto ocurra se necesitarían, al menos, los primeros cinco puntos propuestos por el algoritmo, esto es, en los kilómetros: 5, 30, 47, 75 y 101 (en dirección México – Puebla).

En épocas vacacionales es importante el aumento de servicios de auxilio vial, ya que es en este periodo cuando aumenta el tránsito vehicular, y por tanto, el número de accidentes, por esta razón es indispensable tener cubiertos todos los nodos, es decir, tener tres estaciones fijas y dos más móviles, como ambulancias, para dar auxilio en un tiempo menor.

A través de una revisión bibliográfica, sobre estudios realizados para determinar tiempos de respuesta en servicios de emergencia, se ha podido establecer la existencia de parámetros para indicar el tiempo máximo de arribo a un siniestro.

Bibliografía

- ¹ L. J. Norman. (1963). *Los accidentes del tráfico, epidemiología y prevención*. Cuadernos de Salud Pública, No. 12: Organización Mundial de la Salud. Ginebra.
- ² BOTTA, Néstor A. (2007). Teorías y modelos de accidentes (parte I) [Versión Electrónica]. *Factor de riesgo, una visión actualizada sobre la seguridad*, 2, 28.
- ³ Seguridad eléctrica en lugares de trabajo. (Programa de entrenamiento de cuatro horas para trabajadores de industria en general). Indiana: Purdue University North Central, Center for Occupational Safety & Health. Extraído el 31 enero, 2012. URL: <http://www.pnc.edu/ce/osh/Electrical%20Safe%20SP%20Work%20Practices%20Four%20Hour%20Participant%20Manu.pdf>
- ⁴ TORRES Morera, Luis M.; et. al. Tratado de cuidados críticos y emergencias. Arán Ediciones. Madrid. 2001. Pp. 237
- ⁵ Lira Villavicencio, Manuel. Response times in paramedic ambulance service priority 1 and 2 emergencies. Assisted Emergency Transport System STAE-ESSALUD. Lima, Perú. 2008.
- ⁶ Programa avanzado de apoyo vital en trauma para médicos (ATLS). (s.f.). Extraído el 18 de enero de 2012 de <http://es.scribd.com/doc/71737776/ATLS-Apoyo-Vital-Avanzado-EnTrauma-Para-Mdicos>
- ⁷ QUINTERO PEREDA, Francisco Luis; Et al. Desarrollo de un sistema de información geográfica de accidentes en las carreteras federales de México. México. Instituto Mexicano del Transporte. http://www.ugto.mx/figh/memorias/7.htm#_ftn1
- ⁸ BIRD, Jr., Frank E., Germain, George L. Liderazgo práctico en el control de pérdidas. Copyright International Loss Control Institute, Loganville, Georgia, 1985.
- ⁹ Organización Mundial de la Salud. Defunciones por accidentes de tránsito en países seleccionados de las Américas, 1985-2001. Tomado del Boletín Epidemiológico, Vol. 25 No. 1, marzo 2004. [16 de febrero, 2011; http://www.paho.org/spanish/dd/ais/be_v25n1-acctransito.htm]

¹⁰ Organización Mundial de la Salud. (2008). World Health Statistics. En Organización Mundial de la Salud (Ed.), (versión electrónica, ISBN 978 92 4 0682740) cuarta edición. Francia.

¹¹ *The global burden of disease: 2004 update* publicada en 2008

¹² Córdova Villalobos, José Ángel. Secretario de Salud Pública federal. XLI Reunión Anual Ordinaria de la Conferencia Nacional de Gobernadores (Conago). Nuevo León, Monterrey.

¹³ Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México). Anuario de estadísticas por entidad federativa 2011, cuadro 6.35. [Versión electrónica].

¹⁴ Indicadores de siniestralidad y acciones INEGI, con base en datos proporcionados por la SSP. PF. Estado Mayor. Anuario de estadísticas por entidad federativa, 2011. Fecha de actualización miércoles 25 de mayo de 2011.

¹⁵ Organización Mundial de la Salud (2003), Informe sobre la Salud en el Mundo 2003: Forjemos el Futuro, Suplemento Datos y Cifras. <http://www.who.int/>

¹⁶ Principales causas de mortalidad nacional general, Secretaría de Salud/Dirección General de Información en Salud. Elaborado a partir de la base de datos de defunciones 1979-2008 INEGI/SS.

¹⁷ Fuente cartográfica: Instituto Mexicano del Transporte, Estados de la República Mexicana a escala 1:15,000,000, 2011.

¹⁸ MARTNER PEYRELONGUE, Carlos; Pérez Sánchez, José Arturo; Herrera García, Alfonso. Instituto Mexicano del Transporte. Diagnóstico general sobre la plataforma logística de transporte de carga en México. Publicación Técnica No. 233. Sanfandila, Qro, 2003. <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt233.pdf>

¹⁹ Camacho Lomelí, Rosalía. (2005). El proceso global como transformador espacial, el caso de la carretera TLCAN en México. Memoria para optar al Título de Licenciada en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Distrito Federal.

²⁰ (2012, Enero 31). Puente Internacional Nuevo Laredo III reafirma su liderazgo como la principal Capital Aduanera de Latinoamérica. Entorno, Grupo Editorial Argos. Extraído el 30 de abril, 2012, de <http://entornolaredo.com/?p=967>

²¹ INEGI. Estadísticas del Comercio Exterior de México. Información preliminar. Enero-diciembre. 2011

²² DGST-SCT, (2007), Datos Viales, Dirección General de Servicios Técnicos, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2007.

²³ MENDOZA DÍAZ, Alberto; Et. al. Auditorías de seguridad vial de carreteras en operación. Coloquio de Especialidades del III Congreso Nacional de la Academia de Ingeniería. http://132.247.253.89/apache2-default/mesa/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=139&Itemid=78

²⁴ DGST-SCT, Datos Viales, Dirección General de Servicios Técnicos, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2007

²⁵ Sistemas de Información sobre Accidentes Vehiculares (SIAV). [18 de Agosto, 2011; <http://ve.fb68f6c.vesrv.com/siav/>]

²⁶ Accidentes en caminos federales por régimen de operación y autopista, 2007, 2008 y 2009. INEGI. Anuario de estadísticas por entidad federativa, 2010 y 2011. Con base en datos proporcionados por CAPUFE. Fecha de actualización: miércoles 25 de mayo de 2011.

²⁷ Accidentes México – Puebla. Instituto Mexicano del Transporte. (2007).

²⁸ (2010, Diciembre 21). Deja 13 muertos choque de tráiler en la México-Puebla. TerraTV. Extraído el 8 de febrero, 2012, de <http://www.terra.com.mx/noticias/articulo/1013924/Deja+13+muerτος+choque+de+trailer+en+la+Mexico+Puebla.htm>

²⁹ (2010, Diciembre 21). 13 muertos al chocar un tráiler contra un retén policial cerca de Puebla. CNN México. Extraído el 8 de febrero, 2012, de <http://mexico.cnn.com/nacional/2010/12/21/13-personas-mueren-en-un-choque-de-un-tralier-contra-un-reten-policial>

³⁰ (2011, Junio 26). Accidente en la autopista México-Puebla deja siete muertos. Informador.com.mx. Extraído el 8 de febrero, de <http://www.informador.com.mx/mexico/2011/302673/6/accidente-en-la-autopista-mexico-puebla-deja-siete-muertos.htm>

³¹ (2011, Junio 27). Mueren siete en accidente en la carretera México-Puebla. Zócalo Saltillo. Extraído el 8 de febrero, de <http://www.zocalo.com.mx/seccion/articulo/mueren-siete-en-accidente-en-la-carretera-mexico-puebla>

³² (2012, Enero 16). Confirman 20 heridos por carambola de 43 vehículos en autopista México-Puebla. Milenio. Extraído el 8 de febrero, de <http://www.milenio.com/cdb/doc/noticias2011/2057347d55e5a548e2105cc3d44f0392>

³³ Siniestralidad CAPUFE. [2011; <http://www.capufe.gob.mx/portal/wwwCapufe/Transparencia/ProgramasAnuales/SiniestralidadCapufe2011.pdf>]

³⁴ Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Comisión Técnica del Proyecto Sistema de Información Geográfica de Carreteras de la Subsecretaría de Infraestructura, SCT, Atlas de la red carretera de México, (2011). “Red carretera por tipo de revestimiento (asfalto y concreto hidráulico)”. México.

³⁵ Concrete even smarter than you think. Building Sustainable Highways in Canada. <http://www.cement.ca/en/Highways/Building-Sustainable-Highways-in-Canada.html>

³⁷ ESRI España, Entendiendo nuestro mundo. ¿Qué es un SIG? <http://www.esri.es/es/formacion/que-es-un-sig/>

³⁸ Los Sistemas de Información Geográficos: Origen y Perspectivas. *Revista General de Información y Documentación*, Vol. 7, n.º 1, 94-95.

³⁹ DASKIN S., Mark. Network and Discrete Location, Models, Algorithms, and applications. A Wiley-Interscience Publication. U.S.A. 1995.

⁴⁰ Metaheurística. Editorial DYKINSON. Madrid, 2007. Pp 27

⁴¹ Fuente cartográfica: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), curvas de nivel de la República Mexicana a escala 1:750,000, 1998. Corredores del sistema carretero nacional.

⁴² Fuente cartográfica: Instituto Mexicano del Transporte (IMT), carretera de cuota México – Puebla a escala 1:300,000, 2007.