



Certificación ISO 9001:2008 ‡

RECOMENDACIONES PARA MEJORAR LA SEGURIDAD VIAL EN SITIOS DE CONFLICTO A PARTIR DE MICROSIMULACIÓN DE TRÁNSITO

Nadia Gómez González
Marco Luis Dorado Pineda
Emilio Abarca Pérez
Alberto Mendoza Díaz

**Publicación Técnica No. 489
Sanfandila, Qro., 2017**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Recomendaciones para mejorar la seguridad vial
en sitios de conflicto a partir de microsimulación de
tránsito**

Publicación Técnica No. 489
Sanfandila, Qro., 2017

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Seguridad y Operación del Transporte del Instituto Mexicano del Transporte, por la M. en I. Nadia Gómez González, el M. en I. Marco Luis Dorado Pineda, el M. en I. Emilio Abarca Pérez y el Dr. Alberto Mendoza Díaz.

Se agradece la colaboración de los compañeros de la Coordinación, la M. en I. María Guadalupe Saucedo Rojas, el M. en I. Jaime Guillermo Pérez Castro, el M. en I. Gerardo Ríos Quezada y los estudiantes de maestría Gilberto Chávez Serna, Servando y Rafael por su colaboración en la calibración del equipo Hawkeye, indispensable para el desarrollo del presente trabajo.

Contenido

Resumen	iv
Abstract	v
Resumen ejecutivo	vii
1 Introducción	1
1.1 Objetivo	4
1.2 Alcances	4
1.3 Metodología	4
1.4 Actividades	5
1.5 Beneficios Esperados	6
2 Situación de la Seguridad Vial en las Carreteras Mexicanas	7
2.1 Accidentalidad y sus saldos por Carretera	8
2.2 Selección de los Sitios a Estudiar	13
3 Caracterización de los Sitios Conflictivos en Estudio	19
3.1 Accidentalidad	19
3.1.1 Sitio 1: Kilómetro 208+000 al 208+500, Carretera MEX-057D	19
3.1.2 Sitio 2: Kilómetro 159+000 al 160+000, Carretera MEX-057D	22
3.1.3 Sitio 3: Kilómetro 158+000 al 159+000, Carretera MEX-057D	24
3.2 Estudios de Ingeniería de Tránsito	26
3.3 Estudios de Velocidad de Punto	27
3.3.1 Velocidades de punto para el Sitio 1 (Km 208+000 al 208+500)	28
3.3.2 Velocidades de punto para el Sitio 2 (Km 159+000 al 160+000)	33
3.3.3 Velocidades de punto para el Sitio 3 (Km 158+000 al 159+000)	37

4	Inspección de Seguridad Vial.....	39
4.1	Descripción del proceso realizado para la Inspección de Seguridad Vial	40
4.2	Principales hallazgos, observaciones mayormente detectadas y medidas de mejoramiento propuestas	41
4.2.1	Principales hallazgos	41
4.2.2	Observaciones mayormente detectadas	45
4.3	Medidas de mejoramiento propuestas	47
4.3.1	Severidad lateral.....	47
4.3.2	Sistema de contención	48
4.3.3	Señalamiento Horizontal.....	55
4.3.4	Señalamiento Vertical.....	57
5	Estimación de los beneficios de las medidas de mejoramiento propuestas a través de la microsimulación	61
5.1	Obtención de datos para la microsimulación.....	63
5.2	Microsimulación de los Sitios	71
5.3	Calibración y validación de la simulación	76
5.4	Análisis de Conflictos (Situación actual).....	79
5.5	Simulación de los Sitios en estudio con las medidas de mejoramiento propuestas.....	84
6	Conclusiones.....	95
	Bibliografía	99

Resumen

En el 2011 la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) se adhiere al llamado de las Naciones Unidas, que busca estabilizar y, posteriormente, reducir las cifras previstas de víctimas mortales en accidentes de tránsito en todo el mundo antes de 2020. En atención a dicho llamado y por el campo de acción del sector de que se trata, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) tiene el propósito de participar en todos los pilares, centrándose en el Pilar 2, referente a la infraestructura vial, de forma que con el presente estudio se busca contribuir al mejoramiento de las vías de tránsito.

En términos de infraestructura, se pueden considerar dos tipos de enfoques para el mejoramiento de la vía: preventivos o paliativos. Dentro de estos enfoques pueden identificarse dos actividades que los atienden en forma específica. Como parte del enfoque preventivo, destacan los estudios, tales como las auditorías de seguridad vial, cuyo objetivo es evaluar las condiciones de la vía y proponer medidas de mejoramiento antes de que suceda algún accidente de tránsito; por otro lado, el enfoque paliativo tiene por objetivo primordial proponer medidas de mejoramiento para remediar un problema ya existente.

Con la atención puesta en el análisis de sitios conflictivos, el presente estudio complementa la metodología tradicional de medidas paliativas con metodologías preventivas, entre las que se incluyen inspecciones de seguridad vial. En observancia de esta metodología, se proponen medidas de mejoramiento encaminadas a reducir y mitigar la accidentalidad reportada en los sitios analizados y, mediante el uso de otras herramientas metodológicas, evaluar la efectividad de las medidas propuestas en la reducción de los conflictos presentes en cada sitio.

Abstract

In 2011, the Ministry of Transportation (SCT) adheres to the United Nations' call focused on rendering stable and reducing the number of fatalities in traffic accidents around the world by 2020. In response to that call and because of the scope of the sector this pertains to, the Mexican Transportation Institute (IMT) seeks participation in all pillars, focusing on Pillar 2, relative to the improvement of road infrastructure.

In terms of infrastructure, two approaches to road improvement can be considered: preventive or palliative approaches. Under these approaches, specific activities addressing them can be identified. Under the preventive approach, studies such as road safety audits stand out in order to evaluate the conditions of the road and propose improvement measures before any traffic accident occurs. On the other hand, the palliative approach aims to propose improvement measures in order solve an existing problem.

This study focuses on analyzing conflicting sites, complementing the traditional methodology of palliative measures with preventive methodologies such as road safety inspections, following this methodology in order to propose improvement measures that reduce and mitigate the accidents reported at the sites analyzed and using other methodological tools that evaluate the effectiveness of the proposed measures in the reduction of the present conflicts at each site.

Resumen ejecutivo

Los accidentes de tráfico se han convertido en un problema de salud pública alarmante y son la causa de muchos decesos alrededor del mundo; sin embargo, la mayoría de estos son predecibles y, por lo tanto, se pueden prevenir. En el interés de dar solución a este grave problema de salud, las Naciones Unidas (ONU) ponen en marcha el proyecto del Decenio de Acción por la Seguridad Vial 2011-2020 (ONU, 2011), con el que invita a todos los países a unirse en la misma causa en busca de estabilizar y, posteriormente, reducir las cifras previstas de víctimas mortales en accidentes de tránsito en todo el mundo antes de 2020. Con este objetivo en mente es que se proponen acciones divididas en cinco pilares estratégicos: Pilar 1: Gestión de la seguridad vial; Pilar 2: Vías de tránsito y movilidad más seguras; Pilar 3: Vehículos más seguros; Pilar 4: Usuarios de vías de tránsito más seguros, y Pilar 5: Respuesta tras los accidentes.

Atendiendo dicho llamado y debido al campo de acción del sector de que se trata, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) busca participar en todos los pilares, centrándose en el pilar 2, referente a la infraestructura viaria, de forma que el presente estudio busca hacer contribuciones en materia de mejoramiento de las vías de tránsito mediante el fomento de vías más seguras, con la implementación de medidas de mejoramiento en favor de la seguridad vial.

A fin de determinar la efectividad de las medidas de mejoramiento propuestas, es fundamental conocer la situación y magnitud del problema, por lo que resulta primordial identificar las condiciones actuales de la accidentalidad en las carreteras del país. Por ello, en el capítulo 2 se presenta un panorama general de la situación de la accidentalidad en la Red Carretera Federal y sus consecuencias desde la adhesión de México al Decenio de Acción por la Seguridad Vial 2011-2020. De manera general, se presentan los saldos totales y se observa una reducción en la cantidad de accidentes y personas lesionadas, mientras que para los fallecidos se reporta un periodo de estabilización en el que, si bien la cifra no se reduce significativamente, se ha mantenido relativamente constante en los últimos tres años para los que se dispone de información.

En términos puntuales, el presente estudio busca analizar el comportamiento operativo y de seguridad de dos sitios que muestran alta concentración de accidentes en la carretera México-Querétaro. En el capítulo 3 se presenta la información más relevante de los sitios analizados. Se observa que, a pesar de que el sitio 1 reporta un crecimiento significativo de los volúmenes de tránsito registrados, lo que conlleva a un aumento en la cantidad de percances reportados en el sitio, esto no representa un incremento en la gravedad de los mismos al no reportarse personas fallecidas en los últimos cuatro años. A diferencia del sitio 1,

en el sitio 2 se reporta un menor crecimiento del tránsito diario promedio anual y de la accidentalidad reportada en el sitio, tendencia que no se ve reflejada directamente en la cantidad de víctimas. Se observa que los principales problemas reportados se refieren a la imprudencia de los conductores al reportarse los factores referentes al mismos como causa en la mayoría de los accidentes registrados, siendo una de las más frecuentes la velocidad excesiva, hecho que se hace evidente al ser los choques por alcance los tipos de accidentes más comunes en los sitios analizados.

Complementando el análisis de accidentalidad, se realizó una inspección de seguridad vial (ISV) que consistió en la recolección de datos mediante un vehículo de inspección y se realizó un proceso de codificación a partir de la estructura de una auditoría de seguridad vial convencional. Las principales observaciones encontradas están relacionadas con las zonas de entrecruzamiento, los sistemas de contención, la severidad lateral tanto izquierda como derecha (es decir, todo lo registrado dentro de la franja de 9 m de ancho de la zona lateral adyacente al arroyo vial de la carretera, que debe estar despejada), así como el señalamiento vertical y horizontal. Estas observaciones se detallan en el capítulo 4, en que se describen también las medidas de mejoramiento propuestas para cada problema encontrado.

Para los dos sitios objeto de estudio en el presente trabajo, se detectaron dos problemas principales: el primero se refiere a la longitud de los carriles auxiliares y el segundo al control de velocidades. Para cada uno de los sitios se formularon las recomendaciones pertinentes, y en el capítulo 5 se presenta la evaluación de la efectividad de las mismas, con base en un análisis comparativo de la cantidad de conflictos generados con la situación de operación actual y la cantidad de conflictos esperados con la situación hipotética en la que se implementen las medidas de mejoramiento propuestas en el capítulo 4. Se observan reducciones en la cantidad de conflictos mayores que el 20%, lo que evidencia la mejora de la seguridad vial de los sitios una vez implementadas las medidas propuestas.

Con el presente estudio se destaca la importancia de la complementación de metodologías en la reducción de la accidentalidad vial mediante la implementación de mejoras a la infraestructura y la evaluación de las mismas. Al aplicar análisis como el mostrado en el presente estudio, estamos en posibilidades de estimar los beneficios directos de la implementación de algunas medidas de mejoramiento, al poder inferir una reducción en el número de accidentes esperados al presentarse menos conflictos en los sitios analizados.

1 Introducción

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, cada año mueren alrededor de 1.25 millones de personas en el mundo como resultado de accidentes automovilísticos (OMS, 2015). Los accidentes se encuentran dentro de las principales causas de muerte entre los jóvenes, de los 15 a los 29 años de edad.

Las lesiones ocasionadas por estos accidentes son de importante consideración económica para las víctimas, las familias y la sociedad en general. Se estima que las pérdidas a nivel mundial por causa de los accidentes para los gobiernos son del orden del 3% del producto interno bruto (PIB) y del 5% en países con ingresos bajos y medios (OMS, 2015).

En México, en 2013 la Policía Federal (PF) registró 22,036 accidentes de tránsito en la Red Carretera Federal (RCF), los que dejaron 24,878 víctimas: 3,899 muertos y 20,979 lesionados (*Anuario estadístico de accidentes en carreteras federales*, 2015).

A pesar de haberse convertido en un problema de salud pública alarmante y ser la causa de muchos decesos alrededor del mundo, la mayoría de los accidentes de tráfico son predecibles y, por lo tanto, se pueden prevenir. Con la intención de dar solución a este grave problema de salud, las Naciones Unidas (ONU) puso en marcha el proyecto del Decenio de Acción por la Seguridad Vial 2011-2020 (ONU, 2011), que invita a todos los países a unirse en la misma causa en busca de estabilizar y, posteriormente, reducir las cifras previstas de víctimas mortales en accidentes de tránsito en todo el mundo antes de 2020. Con este objetivo en mente es que se proponen acciones divididas en cinco pilares estratégicos: Pilar 1: Gestión de la seguridad vial; Pilar 2: Vías de tránsito y movilidad más seguras; Pilar 3: Vehículos más seguros; Pilar 4: Usuarios de vías de tránsito más seguros, y Pilar 5: Respuesta tras los accidentes.

En atención a dicho llamado y debido al campo de acción del sector de que se trata, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) busca participar en todos los pilares, centrándose en el pilar 2, referente a la infraestructura viaria, de forma que ha buscado hacer contribuciones en materia de mejoramiento de las vías de tránsito al impulsar vías más seguras, acción que se logra mediante la implementación de medidas de mejoramiento que promuevan la seguridad vial de todos los usuarios de la vía.

Existen diferentes medidas de mejoramiento que dependen principalmente de algunos factores tales como el costo y el tiempo de implementación. Cabe mencionar que los países de altos ingresos económicos suelen implementar medidas de gran escala que involucran desde la etapa de diseño todos los

requisitos de seguridad deseados en la vía, la incorporación de medidas de seguridad en la planeación del transporte y el mejoramiento de los sistemas de seguridad en automóviles, entre otras medidas. Estos países, asimismo, ya cuentan con una política establecida en materia de seguridad vial, lo que facilita la gestión de los recursos para invertir en medidas de mejoramiento, a diferencia de países, como México, que en muchas ocasiones no se tienen los recursos necesarios para implementar medidas de mejoramiento de mayor envergadura.

Algunos países ya han alcanzado avances considerables en materia de seguridad vial, como el caso de Suecia, que ha desarrollado la VISIÓN CERO, cuyo objetivo es erradicar por completo las víctimas a causa de accidentes de tránsito.

En términos de infraestructura, se pueden considerar dos tipos de enfoques para el mejoramiento de la vía: preventivos o paliativos. Dentro de estos enfoques pueden identificarse dos actividades que los atienden en forma específica. Como parte del enfoque preventivo, destacan los estudios, tales como las auditorías de seguridad vial, cuyo objetivo es evaluar las condiciones de la vía y proponer medidas de mejoramiento antes de que suceda algún accidente de tránsito; por otro lado, el enfoque paliativo tiene por objetivo primordial proponer medidas de mejoramiento para remediar un problema ya existente.

Dentro del enfoque preventivo, muchos países de la Unión Europea han efectuado importantes investigaciones en torno al tema de la accidentalidad, destacando entre las principales actividades las establecidas en el pilar 2, al llevar a cabo auditorías de seguridad vial; por el contrario, otros países han impulsado el enfoque paliativo, como es el caso de Suecia, que actualmente ha eliminado por completo los sitios conflictivos de su red de carreteras.

Para poder implementar una medida de mejoramiento, esta debe cumplir algunas condiciones, siendo una de las más conocidas la determinación de su relación beneficio-costos. Por lo general, aquellas medidas de mejoramiento bien planteadas y orientadas a reducir el número de muertes ocasionadas por accidentes de tránsito son rentables por el elevado costo de la vida humana respecto a los costos que supone la implementación de la medida de mejoramiento en cuestión.

En el presente estudio se examinarán únicamente las medidas paliativas, es decir, se analizarán sitios conflictivos que actualmente reportan accidentes con o sin víctimas.

El análisis de sitios conflictivos tiene como objetivo mejorar la seguridad vial en un punto o segmento carretero identificado como de alta concentración de accidentes. La metodología de análisis puede resumirse simplemente en la identificación del problema y la generación de propuestas para mejorar la seguridad vial.

Hoy día, existen muchas herramientas de apoyo para el análisis de la accidentalidad en sitios conflictivos, por ejemplo, aquellas que analizan la información disponible de las bases de datos de la policía y los datos históricos de accidentalidad en los sitios conflictivos, entre otros. Se dispone de una herramienta de análisis que no ha sido utilizada a gran escala en el país y que funciona eficientemente porque no depende de los reportes de la Policía — mismos que pueden llegar a presentar sesgos importantes por la falta de captura de accidentes con únicamente daños materiales—. Una de las nuevas herramientas es lo que se ha denominado “sustitutos de la accidentalidad”, que analiza la accidentalidad considerando variables tales como los tiempos de viaje, velocidades de aproximación, longitudes de cola y porcentajes de vueltas izquierdas, entre otros (Gettman y Head, 2003). Dentro de este tipo de enfoque para el análisis de la accidentalidad prevalece la técnica de análisis de conflictos, misma que data de los años 1960 (Perkins, 1969). Como su nombre lo indica, esta técnica se enfoca en los conflictos vehiculares de la vialidad en cuestión, definiendo primeramente un conflicto como una situación observable en la que dos o más usuarios de la vialidad se aproximan entre ellos en tiempo y espacio de tal manera que se producirá una colisión si sus movimientos continúan sin cambio (Amundsen y Hyden, 1977). Se han llevado a cabo estudios que han demostrado la existencia de una estrecha relación entre accidentes y conflictos vehiculares. Lo anterior se cumple ya que el proceso entre accidentes y conflictos graves es idéntico.

La técnica de análisis de conflictos se basa en las trayectorias de los vehículos de la vialidad, hasta hace algunos años recopiladas de manera manual por observadores colocados en la vialidad en estudio, pero actualmente recogidas de las trayectorias de los vehículos a través de programas de microsimulación de tránsito. De acuerdo con la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos de América (FHWA, por sus siglas en inglés), los accidentes suelen ser casuales (o aleatorios) (FHWA, 2003), lo cual en la mayoría de las ocasiones alienta el proceso de análisis de un sitio y la emisión de las recomendaciones pertinentes. Ante este hecho, la FHWA desarrolló un software denominado Surrogate Safety Assessment Model (SSAM), el cual combina la microsimulación de tráfico con el análisis automatizado de conflictos de tráfico, y permite un análisis de la frecuencia y el tipo de conflictos presentados.

Este documento contiene una propuesta de protocolo de investigación, para la identificación de sitios conflictivos en la RCF, para lo cual se caracterizan las condiciones de operación actuales y se generan las recomendaciones pertinentes con miras a incrementar la seguridad vial, siempre evaluando que las recomendaciones no afecten significativamente la operación del sitio de conflicto.

1.1 Objetivo

El presente estudio propone generar recomendaciones para aumentar la seguridad vial en los principales sitios conflictivos de la RCF, mediante la caracterización por microsimulación de las condiciones actuales de operación, determinando la cantidad de conflictos presentes en los sitios estudiados y analizando con base en dicha herramienta también el efecto de las medidas de mejoramiento sobre la operación de los sitios estudiados, con miras a determinar la relación existente entre la cantidad de conflictos y los índices de accidentalidad y mortalidad para cada sitio.

1.2 Alcances

Se generarán recomendaciones para el mejoramiento de la seguridad vial en sitios conflictivos de la RCF, verificando la operatividad de los mismos mediante un proceso de microsimulación, determinando la disminución de conflictos operativos, y analizando la relación de dichos conflictos con la accidentalidad registrada en los sitios estudiados.

1.3 Metodología

Con base en la información publicada en el *Anuario estadístico de accidentes en carreteras federales*, se determinarán los principales sitios conflictivos de la RCF, mismos que se caracterizarán en cuanto a operación a partir de los Datos Viales y la visita a campo con la finalidad de obtener valores en tiempo real, tales como velocidades de operación de los sitios conflictivos estudiados y distancias promedio entre vehículos, entre otros datos que servirán para alimentar el programa de microsimulación y determinar la cantidad de conflictos presentes en cada sitio, así como identificar la principal problemática de los mismos. De esta manera, se podrán generar las medidas pertinentes orientadas a mejorar la seguridad vial de cada uno de los sitios analizados, para luego evaluar —utilizando el mismo programa de simulación— las modificaciones que sufre la operación de dichos sitios mediante la cuantificación de la reducción o el aumento de la cantidad de conflictos. Por otra parte, con base en la información estadística de accidentes de cada sitio conflictivo, se determinarán los principales índices de accidentalidad y mortalidad con la finalidad de encontrar la relación que existe entre estos y la cantidad de conflictos para, en un futuro, estimar la reducción de la accidentalidad y su severidad en función de la reducción de la cantidad de conflictos en sitios de características operativas similares.

1.4 Actividades

A continuación se presenta una descripción de cada una de las actividades efectuadas como parte de este estudio:

- A. Recopilación de información. Se analizarán los últimos cinco anuarios estadísticos de accidentes en carreteras publicados por el IMT, con el objetivo de determinar los sitios más conflictivos del país; dicha información se complementará con los aforos vehiculares publicados en los Datos Viales, caracterizando de manera inicial el campo de aplicación del presente estudio, para lo cual se eligieron como ejemplo demostrativo del presente proyecto tres de los sitios más conflictivos de la Red Carretera Federal.
- B. Visitas de campo. Una vez determinados los tres sitios conflictivos sujetos a análisis en el presente proyecto, se realizarán visitas de campo a los mismos con la finalidad de recabar toda la información de operación y las condiciones en las que se encuentra la infraestructura actualmente. Se realizarán aforos para corroborar la composición vehicular; se medirán velocidades de operación, y se caracterizará la vía mediante un levantamiento con el Hawkeye de forma que se determinen las características de la infraestructura y operaciones de cada sitio conflictivo.
- C. Caracterización de la operación actual de los sitios conflictivos. Con la información teórica y de campo recabada, se alimentará el software SSAM de microsimulación desarrollado por la FHWA, lo cual permitirá determinar los tipos y la cantidad de conflictos ocasionados por las condiciones de operación actuales en los sitios conflictivos analizados.
- D. Análisis de la información. Una vez caracterizadas las condiciones actuales de operación de los sitios conflictivos y determinados los tipos y la cantidad de conflictos presentes, se determinará la principal problemática en materia de seguridad vial para cada uno de los sitios y se analizarán las posibles medidas de mejoramiento que se pueden aplicar para incrementar la seguridad vial del sitio.
- E. Generación de recomendaciones de mejora de la seguridad vial de los sitios conflictivos. En función de la problemática detectada en cada uno de los sitios conflictivos y sus posibles soluciones, se generarán las recomendaciones correspondientes relativas a mejoras por aplicar en los sitios conflictivos con la finalidad de incrementar la seguridad vial de la zona.
- F. Estimación de la afectación de la implementación de las medidas de mejora sobre la operación del tramo carretero. Una vez obtenidas las medidas de mejoramiento por implementar en cada sitio conflictivo, por medio de microsimulación, se evaluarán las nuevas condiciones de operación del tramo carretero en estudio, para determinar si la implementación de dichas medidas afecta de manera negativa la operación del sitio e identificar los nuevos tipos y la cantidad de conflictos en los sitios analizados.

- G. Determinación de parámetros comparativos. A partir de los resultados de la microsimulación, se obtendrá la cantidad de conflictos en función de las condiciones prevalecientes en los sitios a estudiar, y se comparará contra la cantidad de conflictos obtenida con la simulación de los sitios una vez implementadas las medidas de mejoramiento propuestas.
- H. Elaboración del informe final (publicación del IMT). En esta etapa se realiza el informe final que integra los resultados más relevantes del estudio.

1.5 Beneficios esperados

Con el presente estudio, se busca proporcionar a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes una serie de recomendaciones que mejoren la seguridad vial en los principales sitios conflictivos de la Red Carretera Federal. Con ayuda de la microsimulación, se determinará la influencia de la implementación de dichas contramedidas respecto a la operación del sitio estudiado. Además, se obtendrá la relación entre los sitios conflictivos y la cantidad de conflictos presentes en el sitio respecto a los índices de accidentalidad y mortalidad del tramo en análisis.

2 Situación de la seguridad vial en las carreteras mexicanas

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, cada año mueren alrededor de 1.25 millones de personas en el mundo como resultado de accidentes automovilísticos (OMS, 2015). Los accidentes se encuentran dentro de las principales causas de muerte entre los jóvenes, desde los 15 a los 29 años de edad.

Las lesiones ocasionadas por estos accidentes son de importante consideración económica para las víctimas, las familias y la sociedad en general. Se estima que las pérdidas a nivel mundial por causa de los accidentes para los gobiernos son del orden del 3% del producto interno bruto (PIB) y de 5% en países con ingresos bajos y medios (OMS, 2015).

En México, cada año la Policía Federal (PF) registra más de 17 mil accidentes, mismos que dejan un saldo de aproximadamente 3,500 muertos y 50 mil lesionados, tan solo en la Red Carretera Federal (RCF) (*Anuario estadístico de accidentes en carreteras federales, 2011-2015*). En la tabla 2.1 se presentan las estadísticas de accidentalidad y sus saldos para los últimos cinco años, obtenidos con base en información disponible.

Tabla 2.1 Estadísticas de accidentalidad y sus saldos para la RCF, 2011-2015

	Año				
	2011	2012	2013	2014	2015
Accidentes	24,905	24,216	22,036	18,014	17,264
Muertos	4,398	4,548	3,899	3,784	3,547
Lesionados	26,056	24,736	20,979	17,504	15,738

Fuente: Elaboración propia con datos de los *Anuarios estadísticos de accidentes en carreteras federales, 2011-2015*.

En la figura 2.1 se observan gráficamente las estadísticas mostradas en la tabla anterior. Se observa que, mientras que la cantidad de accidentes y lesionados tiene un comportamiento similar, es decir, se reporta una reducción, la cantidad de muertos se mantuvo constante entre 2011 y 2012 y, a partir de 2013, se reportan pequeñas reducciones respecto a los años anteriores.

En la práctica común y con fines comparativos entre carreteras, se acostumbra obtener una serie de indicadores e índices. A continuación se describe el indicador obtenido para las carreteras mexicanas, y en las tablas siguientes se presentan los valores correspondientes a aquellas con mayor índice.

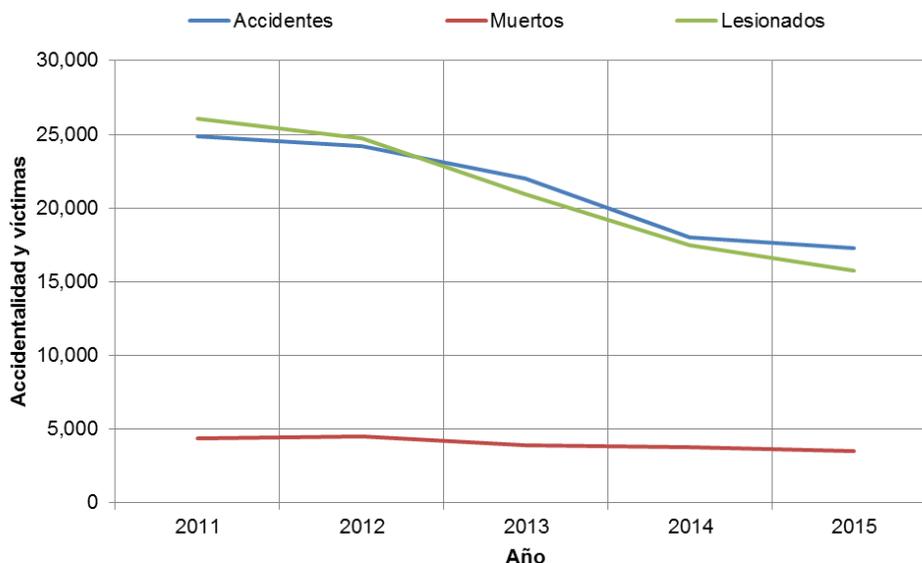


Figura 2.1 Accidentalidad y sus saldos para la RCF, 201-2015

Número de accidentes equivalentes (NAE): El NAE es un indicador utilizado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) para ponderar en una sola cifra los saldos de accidentes, muertos y heridos ocurridos en un sitio determinado, y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$NAE = \text{número de accidentes} + 6(\text{número de muertos}) + 2(\text{número de lesionados})$$

2.1 Accidentalidad y saldos, por carretera

La Red Carretera Federal está compuesta por aproximadamente 151 rutas que comunican al país, mismas que, a su vez, se dividen en más de 530 carreteras federales.

Con la finalidad de poder comparar la seguridad vial de las diferentes rutas, se obtiene para cada una el NAE, con lo cual se identifican las rutas más peligrosas, de acuerdo con el criterio del número de accidentes equivalente, mismo que toma en cuenta la cantidad de muertos y lesionados reportados en cada ruta. En las tablas 2.2 a 2.7 se presentan las 15 rutas que reportan el mayor NAE para el periodo del 2011 al 2015.

En la tabla 2.2 se observa que las primeras 13 rutas, consideradas como las más peligrosas con base en el NAE, se repiten para los cinco años analizados, aunque no siempre en el mismo orden. Es importante notar que la mayoría de las rutas más peligrosas comunican la zona centro con la región norte del país.

Tabla 2.2 Rutas más peligrosas con base en el NAE, 2011-2015

Núm. de ruta	Nombre de la ruta	Longitud de la ruta (km)	Accidentes	Muertos	Lesionados	NAE
2011						
MEX-180	Matamoros - Puerto Juárez	2,848	1,561	245	1,394	5,819
MEX-015	México - Nogales	2,524	1,388	227	1,436	5,622
MEX-045	México - Ciudad Juárez	2,050	1,286	214	1,154	4,878
MEX-015D	México - Nogales (cuota)	1,732	1,004	229	1,229	4,836
MEX-200	Tepic - Puente Talismán	2,505	1,002	211	1,100	4,468
MEX-057	México - Piedras Negras	1,275	1,048	153	961	3,888
MEX-057D	México - Piedras Negras (cuota)	628	853	149	806	3,359
MEX-150D	México - Veracruz (cuota)	384	912	121	834	3,306
MEX-085	México - Nuevo Laredo	1,415	782	111	764	2,976
MEX-190	México - Ciudad Cuauhtémoc	1,693	603	118	769	2,849
MEX-001	Tijuana - Los Cabos	2,108	856	91	600	2,602
MEX-002	Playa Lauro Villar - Tijuana	2,229	535	116	520	2,271
MEX-080	Tampico - Barra de Navidad	933	511	63	584	2,057
MEX-040	Reynosa - Mazatlán	1,300	530	80	453	1,916
MEX-095D	México - Acapulco (cuota)	421	361	88	457	1,803
2012						
MEX-015	México - Nogales	2,526	1,346	260	1,378	5,662
MEX-180	Matamoros - Puerto Juárez	2,839	1,388	229	1,306	5,374
MEX-015D	México - Nogales (cuota)	1,708	1,019	239	1,402	5,257
MEX-045	México - Ciudad Juárez	2,028	1,257	238	1,148	4,981
MEX-200	Tepic - Puente Talismán	2,534	953	178	1,109	4,239
MEX-057	México - Piedras Negras	1,279	935	171	906	3,773
MEX-150D	México - Veracruz (cuota)	384	836	110	795	3,086
MEX-057D	México - Piedras Negras (cuota)	666	783	126	696	2,931
MEX-190	México - Ciudad Cuauhtémoc	1,471	581	98	686	2,541
MEX-001	Tijuana - Los Cabos	2,108	740	92	589	2,470
MEX-002	Playa Lauro Villar - Tijuana	2,229	587	114	528	2,327
MEX-085	México - Nuevo Laredo	1,415	643	70	625	2,313
MEX-080	Tampico - Barra de Navidad	933	542	90	549	2,180
MEX-040	Reynosa - Mazatlán	1,313	492	130	424	2,120
MEX-045D	México - Ciudad Juárez (cuota)	660	397	87	416	1,751

Fuente: Elaboración propia con datos de los Anuarios estadísticos de accidentes en carreteras federales, 2011-2015

**Tabla 2.2 Rutas más peligrosas con base en el NAE, 2011-2015
(continuación)**

Nº de Ruta	Nombre de la ruta	Longitud de la ruta (km)	Accidentes	Muertos	Lesionados	NAE
2013						
MEX-015	México - Nogales	2,020	1,307	202	1281	5081
MEX-180	Matamoros - Puerto Juárez	2,340	1,385	226	1106	4953
MEX-045	México - Ciudad Juárez	1,702	1,100	192	972	4196
MEX-057	México - Piedras Negras	1,201	1,200	174	946	4136
MEX-200	Tepic - Puente Talismán	2,283	958	126	1007	3728
MEX-015D	México - Nogales (cuota)	1,511	833	175	914	3711
MEX-190	México - Ciudad Cuauhtémoc	1,332	539	95	650	2409
MEX-085	México - Nuevo Laredo	1,155	599	104	560	2343
MEX-080	Tampico - Barra de Navidad	989	564	100	554	2272
MEX-150D	México - Veracruz (cuota)	383	722	78	440	2070
MEX-057D	México-Piedras Negras(cuota)	576	492	81	512	2002
MEX-001	Tijuana - Los Cabos	1,732	589	72	486	1993
MEX-002	Playa Lauro Villar - Tijuana	1,995	526	52	334	1506
MEX-095D	México - Acapulco (cuota)	413	403	74	320	1487
MEX-095	México - Acapulco	438	392	60	349	1450
2014						
MEX-015	México - Nogales	1,885	984	224	1,000	4328
MEX-180	Matamoros - Puerto Juárez	2,322	1,051	232	856	4155
MEX-057	México - Piedras Negras	1,201	1,064	166	826	3712
MEX-045	México -Ciudad Juárez	1,686	952	178	822	3664
MEX-200	Tepic - Puente Talismán	2,254	884	149	941	3660
MEX-015D	México - Nogales (cuota)	1,511	611	145	736	2953
MEX-085	México - Nuevo Laredo	1,142	586	137	485	2378
MEX-150D	México - Veracruz (cuota)	383	525	106	518	2197
MEX-057D	México - Piedras Negras (cuota)	575	435	100	489	2013
MEX-001	Tijuana - Los Cabos	1,725	465	96	436	1913
MEX-190	México - Ciudad Cuauhtémoc	1,321	424	85	482	1898
MEX-080	Tampico - Barra de Navidad	984	411	87	417	1767
MEX-002	Playa Lauro Villar - Tijuana	1,884	398	111	340	1744
MEX-095D	México - Acapulco (cuota)	413	332	74	333	1442
MEX-054	Colima - Ciudad Mier	903	283	72	320	1355

Fuente: Elaboración propia con datos de los Anuarios Estadísticos de Accidentes en Carreteras Federales, 2011-2015.

**Tabla 2.2 Rutas más peligrosas con base en el NAE, 2011-2015
(continuación)**

Núm. de ruta	Nombre de la ruta	Longitud de la ruta (km)	Accidentes	Muertos	Lesionados	NAE
2015						
MEX-015	México - Nogales	2,018	909	197	917	3925
MEX-180	Matamoros - Puerto Juárez	2,334	1,007	187	770	3669
MEX-057	México - Piedras Negras	1,201	1,034	167	743	3522
MEX-045	México - Ciudad Juárez	1,735	965	135	820	3415
MEX-200	Tepic - Puente Talismán	2,286	777	161	678	3099
MEX-015D	México - Nogales (cuota)	1,538	617	148	591	2687
MEX-057D	México - Piedras Negras (cuota)	606	494	95	532	2128
MEX-085	México - Nuevo Laredo	1,155	508	99	457	2016
MEX-150D	México - Veracruz (cuota)	383	535	90	430	1935
MEX-190	México - Ciudad Cuauhtémoc	1,332	480	76	458	1852
MEX-001	Tijuana - Los Cabos	1,732	425	60	358	1501
MEX-080	Tampico - Barra de Navidad	984	353	77	329	1473
MEX-002	Playa Lauro Villar - Tijuana	1,991	371	88	248	1395
MEX-095D	México - Acapulco (cuota)	413	304	54	268	1164
MEX-054	Colima - Ciudad Mier	909	265	50	270	1105

Fuente: Elaboración propia con datos de los Anuarios estadísticos de accidentes en carreteras federales, 2011-2015.

De manera similar al análisis de rutas, se analizó la red federal a nivel de detalle de carretera, y en la tabla 2.3 se presentan las diez carreteras más peligrosas con base en el NAE, para los últimos cinco años de los que se dispone de información. En dicha tabla se observa que, para todos los años analizados, la carretera México-Querétaro (cuota) es la que presenta el mayor NAE, es decir, resulta la más peligrosa de acuerdo con el criterio establecido: en el periodo analizado, esta ruta registra un total de 2,388 accidentes que dejaron como consecuencia 381 personas muertas y 2,143 lesionadas.

Luego de observar este comportamiento, se decide analizar en este trabajo la carretera México-Querétaro (cuota) y, considerando la disponibilidad de recursos con que cuenta la institución, se busca analizar tramos cercanos al IMT. En la siguiente sección, se presentan los tramos elegidos para el presente análisis con el que se buscará esclarecer las causas asociadas a la infraestructura para proponer medidas de mejoramiento efectivas que ayuden a reducir el número de accidentes en los sitios con alta concentración de accidentes y víctimas y mitigar sus consecuencias.

Tabla 2.3 Carreteras más peligrosas con base en el NAE, 2011-2015

Ruta	Clave de carretera	Carretera	Longitud de la carretera (km)	TDPA	Accidentes	Muertos	Lesionados	NAE
2011								
MEX-057D	411	México - Querétaro (cuota)	212	49,833	572	101	546	2,270
MEX-150D	485	Puebla - Córdoba (cuota)	178.1	20,898	548	57	433	1,756
MEX-057	165	Querétaro - San Luis Potosí	204.3	29,521	443	48	403	1,537
MEX-180	528	Coatzacoalcos - Villahermosa	171.4	20,238	411	46	278	1,243
MEX-150D	450	México - Puebla (cuota)	107.5	57,565	283	45	297	1,147
MEX-015	26445	Hermosillo - Nogales	277	11,589	215	52	299	1,125
MEX-136	52	Los Reyes - Zacatepec	189.2	21,325	271	38	302	1,103
MEX-095D	45	Cuernavaca - Acapulco (cuota)	277.2	12,081	198	52	274	1,058
MEX-015D	18	Atzacmulco - Zapotlanejo (cuota)	374.8	7,386	173	56	271	1,051
MEX-090	114	Irapuato - Guadalajara	217.6	15,319	233	60	223	1,039
2012								
MEX-057D	411	México - Querétaro (cuota)	212	52,790	488	85	467	1,932
MEX-150D	485	Puebla - Córdoba (cuota)	178.1	26,453	499	63	400	1,677
MEX-057	165	Querétaro - San Luis Potosí	204.3	32,372	425	61	408	1,607
MEX-015	26445	Hermosillo - Nogales	277	12,288	217	41	355	1,173
MEX-015D	18	Atzacmulco - Zapotlanejo (cuota)	374.8	8,585	191	52	324	1,151
MEX-136	52	Los Reyes - Zacatepec	189.2	21,811	273	44	286	1,109
MEX-180	528	Coatzacoalcos - Villahermosa	171.4	21,587	345	42	255	1,107
MEX-200	75	Tapanatepec - Talismán	310.8	7,624	216	49	293	1,096
MEX-307	23132	Reforma Agraria - Puerto Juárez	357.5	19,545	346	43	230	1,064
MEX-015	26444	Ciudad Obregón - Hermosillo	264	10,585	252	31	302	1,042
2013								
MEX-057D	411	México - Querétaro (cuota)	185.2	55,316	471	56	397	1601
MEX-057	165	Querétaro - San Luis Potosí	187.9	32,856	401	65	328	1447
MEX-150D	485	Puebla - Córdoba (cuota)	173.1	27,214	377	53	277	1249
MEX-015	26444	Ciudad Obregón - Hermosillo	251	10,773	230	35	312	1064
MEX-180	528	Coatzacoalcos - Villahermosa	166	24,085	352	42	192	988
MEX-307	23132	Reforma Agraria - Puerto Juárez	339.9	17,944	245	39	234	947
MEX-015D	18	Atzacmulco - Zapotlanejo (cuota)	374.7	8,338	179	47	231	923
MEX-057	405	Matehuala - Saltillo	226.7	13,467	252	37	194	862
MEX-136	52	Los Reyes - Zacatepec	178.9	22,788	209	37	213	857
MEX-095D	45	Cuernavaca - Acapulco (cuota)	262.9	13,276	199	46	186	847

Fuente: Elaboración propia con datos de los Anuarios estadísticos de accidentes en carreteras federales, 2011-2015.

**Tabla 2.3 Carreteras más peligrosas con base en el NAE, 2011-2015
(continuación)**

Ruta	Clave de carretera	Carretera	Longitud de la carretera (km)	TDPA	Accidentes	Muertos	Lesionados	NAE
2014								
MEX-057D	411	México - Querétaro (cuota)	185.2	57,843	438	71	374	1,612
MEX-057	165	Querétaro - San Luis Potosí	187.9	32,512	369	60	278	1,285
MEX-095D	45	Cuernavaca - Acapulco (cuota)	262.9	13,876	216	49	246	1,002
MEX-150D	450	México - Puebla (cuota)	110.9	52,093	217	42	241	951
MEX-150D	485	Puebla - Córdoba (cuota)	173.1	26,292	243	41	193	875
MEX-015D	18	Atzacmulco - Zapotlanejo (cuota)	374.7	8,033	142	37	217	798
MEX-085	462	Ciudad Victoria - Monterrey	258	14,200	194	44	156	770
MEX-307	23132	Reforma Agraria - Puerto Juárez	339.9	14,750	212	26	196	760
MEX-045	154	Querétaro - Irapuato (libre)	91.4	39,165	214	35	167	758
MEX-180	528	Coatzacoalcos - Villahermosa	166	21,632	270	32	144	750
2015								
MEX-057D	411	México - Querétaro (cuota)	185.2	59,643	419	68	359	1545
MEX-057	165	Querétaro - San Luis Potosí	187.9	34,153	335	46	224	1059
MEX-135D	109	Cuacnopalan - Oaxaca (cuota)	243	5,858	105	66	204	909
MEX-015D	18	Atzacmulco - Zapotlanejo (cuota)	374.7	8,647	168	57	195	900
MEX-150D	450	México - Puebla (cuota)	110.86	54,339	198	30	231	840
MEX-150D	485	Puebla - Córdoba (cuota)	173.14	21,561	273	45	143	829
MEX-095D	45	Cuernavaca - Acapulco (cuota)	262.9	12,728	200	28	202	772
MEX-307	23132	Reforma Agraria - Puerto Juárez	339.9	15,202	205	34	164	737
MEX-180	528	Coatzacoalcos - Villahermosa	166	21,897	254	35	134	732
MEX-057	405	Matehuala - Saltillo	226.66	15,372	218	34	152	726

Fuente: Elaboración propia con datos de los *Anuarios estadísticos de accidentes en carreteras federales*, 2011-2015.

2.2 Selección de los sitios a estudiar

Según la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC) (2003), se han reconocido a las intersecciones como los puntos más peligrosos de las carreteras. Lord *et al.* (2005) explican que alrededor del 43% de los accidentes ocurridos en Estados Unidos tuvieron lugar cerca de una intersección, y de la misma manera, Elvik y Vaa (2004) afirman que alrededor del 40% de los accidentes ocurridos en Noruega sucedieron en cruces.

Luego de analizar los tramos y segmentos de la carretera México-Querétaro (cuota) que reportan accidentes, se detectaron tres sitios en las inmediaciones del IMT. Dichos sitios se caracterizan por tener intersecciones de vías secundarias con la carretera MEX-057, siendo dos de ellas incorporaciones de las zonas

urbanas aledañas y la otra una incorporación de un retorno de la propia carretera. Dada la cercanía y naturaleza de las zonas seleccionadas, se decidió aplicar la metodología propuesta en el presente trabajo, con miras a atender la problemática de los puntos localizados en las inmediaciones del Instituto. En la tabla 2.4 se presenta la información relativa a la accidentalidad para los tramos seleccionados y sus saldos.

Tabla 2.4 Tramos peligrosos de la carretera 411 México-Querétaro (cuota) cercanos al IMT

Año	Accidentes	Muertos	Lesionados	NAE
T. Der. Libramiento Norte de Querétaro - Querétaro (km 207.6-212)				
2011	55	3	14	101
2012	36	1	14	70
2013	52	0	20	92
2014	33	0	14	61
2015	28	1	9	52
T. Der. Ote. San Juan del Río - T. Der. Pte. San Juan del Río (km 158.1-164.1)				
2011	30	7	17	106
2012	43	13	27	175
2013	25	1	8	47
2014	16	2	15	58
2015	17	8	14	93

Fuente: Elaboración propia con datos de los *Anuarios estadísticos de accidentes en carreteras federales, 2011-2015*.

La descripción de las incorporaciones se presenta en la tabla 2.5, en la que se muestra el detalle de los sitios elegidos para el presente proyecto, mismos que se localizan entre los kilómetros 160+000 y 209+000 de la carretera MEX-057D en el estado de Querétaro.

Tabla 2.5 Detalle de los sitios analizados

Sitio	Carretera	Km	Referencia	Sentido	Observaciones
1	MÉX-57	208+000 al 208+500	Incorporación del Boulevard Bernardo Quintana a la carretera MEX-057	MEX- Qro	Zona urbana de la ciudad de Querétaro

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.5 Detalle de los sitios analizados (continuación)

Sitio	Carretera	Km	Referencia	Sentido	Observaciones
2	MÉX-57	159+000 al 160+000	Incorporación de San Juan del Río a la carretera MEX-057	MEX-Qro	A la altura del acceso 2 a San Juan del Río
3	MÉX-57	158+000 al 159+000	Incorporación de retorno a desnivel	MEX-Qro	A la altura del acceso 2 a San Juan del Río

Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 2.2 y 2.3 se muestran los esquemas de los sitios analizados.



Figura 2.2 Esquema del sitio 1, km 208+000 al 208+500



Figura 2.3 Esquemas del sitio 2 (km 159+000 al 160+000) y el sitio 3 (km 158+000 al 159+000)

Una vez definidos los sitios a estudiarse, se caracterizó la operación de los mismos, obteniendo algunas características del comportamiento del tránsito, tales como el tránsito diario promedio anual (TDPA), análisis de las velocidades de punto y otros detalles de la accidentalidad de los mismos.

A fin de lograr caracterizar cada sitio, es necesario analizar el comportamiento del tránsito en cada uno de los elementos de infraestructura que lo componen, de manera que para cada sitio se analizan dos puntos: uno correspondiente a la carretera MEX-057D (tramos en tangente) y el otro correspondiente a la incorporación de la zona urbana y del retorno. En la tabla 2.6 se describe cada uno de los puntos de cada sitio analizado.

Tabla 2.6 Puntos caracterizados para cada sitio

Sitio	Punto	Descripción
1	P1	Gaza de incorporación del Boulevard Bernardo Quintana a la carretera MEX-057 en el sentido México-Querétaro
	P2	Carril derecho de la carretera MEX-057 en el sentido México-Querétaro, kilómetro 208+000 al 208+500, tramo en tangente

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.6 Puntos caracterizados para cada sitio (continuación)

Sitio	Punto	Descripción
2	P3	Gaza de incorporación de San Juan del Río a la carretera MEX-057 en el sentido México-Querétaro
	P4	Carril derecho de la carretera MEX-057 en el sentido México-Querétaro, kilómetro 159+000 al 160+000, tramo en tangente
3	P5	Carril auxiliar de retorno sobre la carretera MEX-057, a la altura de San Juan del Río
	P6	Carril derecho de la carretera MEX-057 en el sentido México-Querétaro, kilómetro 158+000 al 159+000, tramo en tangente

Fuente: Elaboración propia.

3 Caracterización de los sitios conflictivos en estudio

Una vez elegidos los sitios objeto del presente estudio, se caracterizarán analizando la información disponible sobre accidentalidad, estudios de ingeniería de tránsito y estudios de velocidad de punto.

3.1 Accidentalidad

El tema de la accidentalidad de los sitios elegidos para análisis se comenzó a abordar en el capítulo anterior y en el presente apartado se detallará al respecto.

Las estadísticas presentadas a continuación se refieren a los sitios seleccionados a analizar en el presente proyecto y corresponden a los años 2012, 2013, 2014 y 2015, por ser estos años para los cuales se cuenta con información detallada sobre el tipo de accidente y sus causas (*Anuario estadístico de accidentes en carreteras federales, 2011-2015*).

3.1.1 Sitio 1: kilómetro 208+000 al 208+500, carretera MEX-057D

En el periodo comprendido de 2012 a 2015, se tienen registrados 53 accidentes en el sitio, 13 de los cuales reportaron víctimas, con un saldo de 17 personas lesionadas; en el periodo analizado no se reportaron muertos. En la tabla 3.1 se presentan los saldos anuales para este sitio.

Tabla 3.1 Saldos anuales para el sitio 1, km 208+000 al 208+500

Año	Accidentes	Muertos	Lesionados	NAE
2012	9	0	3	15
2013	18	0	10	38
2014	10	0	1	12
2015	16	0	3	22
Total	53	0	17	87

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3.1 se observa una tendencia al alza en la cantidad de accidentes reportados en el sitio 1, presentándose un pico máximo en el 2013, mismo que concentra más del 50% de las víctimas totales reportadas en el periodo de análisis. De manera similar que en el capítulo anterior, se obtuvo el número de

accidentes equivalentes (NAE), cuya evolución muestra un comportamiento similar a la accidentalidad, aunque es en 2014 el año que reporta el menor valor, influido esto por el hecho de que se reportó únicamente un lesionado.

Con el propósito de entender el comportamiento del sitio se analizan los accidentes por tipo, y se observa que son los choques por alcance el tipo de accidente más común en este sitio, representando el 43% de los accidentes totales reportados para el periodo 2012-2015, seguidos por el choque contra objeto fijo con 19% y choque lateral con 17%. En la figura 3.1 se observa la distribución por tipo de accidente para el periodo analizado.

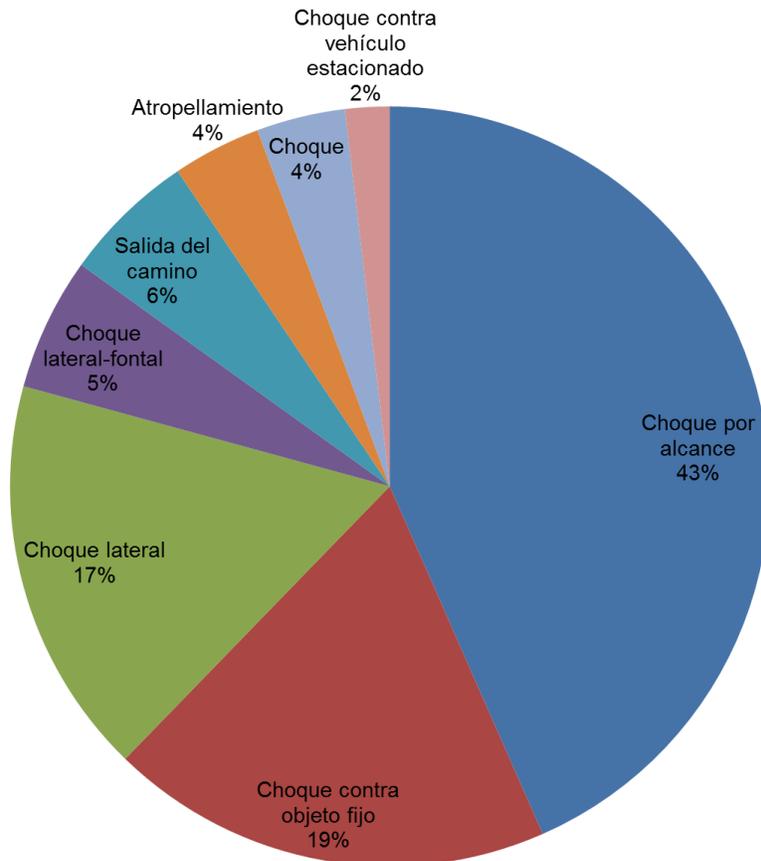


Figura 3.1 Tipo de accidentes reportados en el sitio 1 para el periodo 2012-2015

Adicionalmente a este análisis, se observa que los choques laterales corresponden al tipo de accidente que dejaron como saldo la mayor cantidad de lesionados, con seis víctimas para el periodo analizado (véase la tabla 3.2), seguidos por los choques por alcance que reportan cuatro lesionados. Los choques lateral-frontal se refieren a aquellos accidentes en los que se impactan las partes laterales frontales de los vehículos, y el rubro de choque, que representa el 2% de los accidentes totales del periodo analizado, se refiere a dos accidentes de los cuales no se tienen más detalles, por lo que no se puede especificar el tipo de choque del que se trata. Una vez identificados los principales tipos de accidentes, se analizará el sitio 1 para determinar si existe influencia de la

infraestructura en la ocurrencia de dichos accidentes y poder proponer medidas de mejoramiento aplicadas a la infraestructura a efectos de disminuir la ocurrencia de este tipo de accidentes.

Tabla 3.2 Tipo de accidentes reportados en el sitio 1 y sus saldos, 2012-2015

Tipo de Accidente	Accidentes	Lesionados
Choque por alcance	23	4
Choque contra objeto fijo	10	1
Choque lateral	9	6
Choque lateral-frontal	3	1
Salida del camino	3	1
Atropellamiento	2	3
Choque	2	1
Choque contra vehículo estacionado	1	0
Total	53	17

Fuente: Elaboración propia.

De la base de datos proporcionada, se tiene información referente a las causas de accidentes, mismos que son multicausales: se tienen registradas en total 52 causas asociadas a los 47 accidentes que reportan causas, es decir, en total seis de los 53 accidentes no reportan información referente a las causas. En la figura 3.2 se muestran la distribución y la combinación de causas que ocasionaron los accidentes en el sitio 1. El conductor como único causante es responsable del 79.2% de los accidentes, mientras que en la combinación de factores destacan el conductor y el vehículo, con el 5.7%, y el conductor, el camino y el clima, con 1.9%; en el 1.9% de los accidentes se reporta como causa exclusivamente al vehículo y para el restante 11.3% no se tiene información de las causas que los originaron.

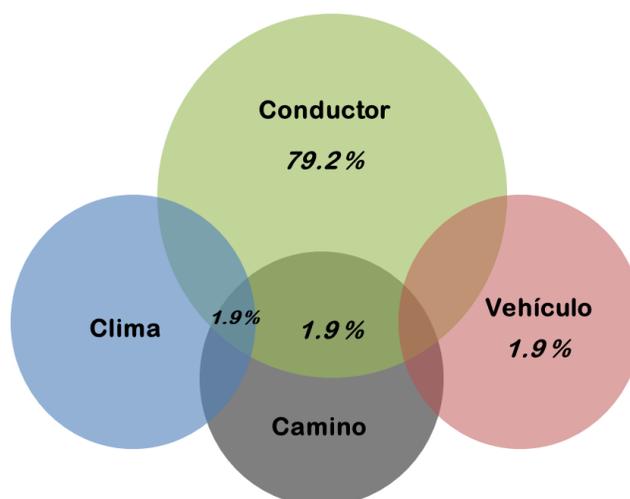


Figura 3.2 Distribución y combinación de las causas que ocasionaron los accidentes en el sitio 1 en el periodo 2012-2015

Respecto a las causas asociadas al conductor, las más frecuentes son la velocidad excesiva, no guardar distancia y la invasión de carril. Como se observa, la mayoría de las causas están asociadas al factor humano, motivo por el cual, desde hace algunos años a nivel mundial, se busca encontrar soluciones para mejorar la infraestructura de forma que “perdone” el error humano y se reduzca la accidentalidad y mitiguen sus consecuencias.

3.1.2 Sitio 2: kilómetro 159+000 al 160+000, carretera MEX-057D

Para el mismo periodo analizado, 2012-2015, en el sitio 2 se reportaron 32 accidentes que dejaron un saldo de nueve personas muertas y 21 lesionadas. En la tabla 3.3 se presentan los saldos anuales para este sitio.

Tabla 3.3 Saldos anuales para el sitio 2, km 159+000 al 160+000

Año	Accidentes	Muertos	Lesionados	NAE
2012	13	7	6	67
2013	9	1	5	25
2014	7	0	8	23
2015	3	1	2	13
Total	32	9	21	128

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3.3 se observa una disminución anual en la cantidad de accidentes reportados en el sitio 2; sin embargo, esto no sucede con las víctimas: se observa que en 2014 se reportaron más lesionados que en años anteriores, bajando nuevamente la cantidad en 2015. De igual manera que para el sitio 1 y el capítulo anterior, se obtuvo el número de accidentes equivalentes (NAE), cuya evolución muestra una importante reducción entre 2012 y 2013, siendo a partir de 2013 que se reporta una disminución.

Tratando de entender el comportamiento del sitio es que se analizan los accidentes por tipo, observándose que son los choques por alcance el tipo de accidente más común en este sitio, representando el 50.0% de los accidentes totales reportados para el periodo 2012-2015, seguidos por el choque contra objetos fijos con 25.0%. En la figura 3.3 se observa la distribución por tipo de accidente para el periodo analizado.

Adicionalmente a este análisis, se observa que son los choques por alcance el tipo de accidente que dejó como saldo la mayor cantidad de víctimas, reportando cuatro muertos y 14 lesionados para el periodo analizado, seguido por el choque lateral que ocasionó cuatro personas fallecidas y tres personas lesionadas (véase la tabla 3.4). Otros tipos de accidentes que ocasionaron víctimas fueron los choques contra objetos fijos y una salida del camino. De igual forma que para el sitio 1, una vez identificados los principales tipos de accidentes, se analizará la infraestructura del sitio para determinar si existe influencia de ésta en la ocurrencia

de dichos accidentes y poder proponer medidas de mejoramiento aplicadas a la infraestructura a fin de disminuir la ocurrencia de este tipo de accidentes.

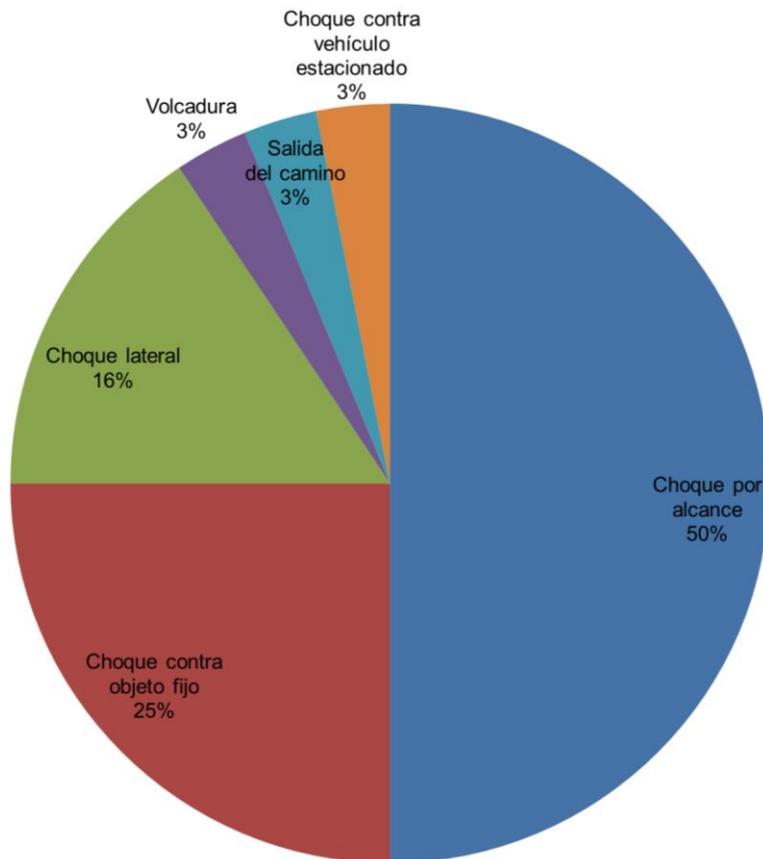


Figura 3.3 Tipo de accidentes reportados en el sitio 2 para el periodo 2012-2015

Tabla 3.4 Tipo de accidentes reportados en el sitio 2 y sus saldos, 2012-2015

Tipo de accidente	Cantidad	Lesionados	Muertos
Choque por alcance	16	14	4
Choque contra objeto fijo	8	2	1
Choque lateral	5	3	4
Volcadura	1	0	0
Salida del camino	1	2	0
Choque contra vehículo estacionado	1	0	0
Total	32	21	9

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, los accidentes son multicausales, por lo que para el sitio 2 se tienen registradas un total de 31 causas para los 32 accidentes sobre los que se dispone de información, es decir, no se tiene información para el 3.13% de los accidentes referente a las causas (un accidente). Los únicos dos

factores reportados como causantes de los accidentes en este sitio son el conductor como responsable en el 90.6% de los casos y el vehículo en el restante 6.3% de los accidentes reportados en el sitio 2.

Respecto a las causas asociadas al conductor, las más frecuentes son la velocidad excesiva y no guardar distancia; también se reporta el no ceder el paso, entre otras. Al igual que en el sitio 1, la mayoría de las causas están asociadas al factor humano, motivo por el cual se busca encontrar soluciones para mejorar la infraestructura de forma que “perdone” el error humano con miras a reducir la accidentalidad y mitigar sus consecuencias.

3.1.3 Sitio 3: kilómetro 158+000 al 159+000, carretera MEX-057D

Para el mismo periodo analizado, 2012-2015, en el sitio 3 se han reportado 16 accidentes que dejaron un saldo de tres personas muertas y seis lesionadas. En la tabla 3.5 se presentan los saldos anuales para este sitio.

Tabla 3.5 Saldos anuales para el sitio 2, km 158+000 al 159+000

Año	Accidentes	Muertos	Lesionados	NAE
2012	3	2	0	15
2013	5	0	1	7
2014	3	1	0	9
2015	5	0	5	15
Total	16	3	6	46

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3.5 se observa una disminución anual en la cantidad de accidentes reportados en el sitio 3, con un incremento en 2015, situación que se repite con las víctimas al reportar cinco de los seis lesionados totales del sitio en 2015. Respecto a los muertos, en 2012 se reportó la mayor cantidad. De igual manera que para los sitios anteriores, se obtuvo el número de accidentes equivalentes (NAE), cuya evolución muestra una reducción entre 2012 y 2014, incrementándose nuevamente en 2015.

Tratando de entender el comportamiento del sitio es que se analizan los accidentes por tipo, y se observa que son los choques por alcance el tipo de accidente más común en este sitio, representando el 37.0% de los accidentes totales reportados para el periodo 2012-2015, seguidos por la salida del camino, que representa el 19.0% de los accidentes totales. En la figura 3.4 se observa la distribución por tipo de accidente para el periodo analizado.

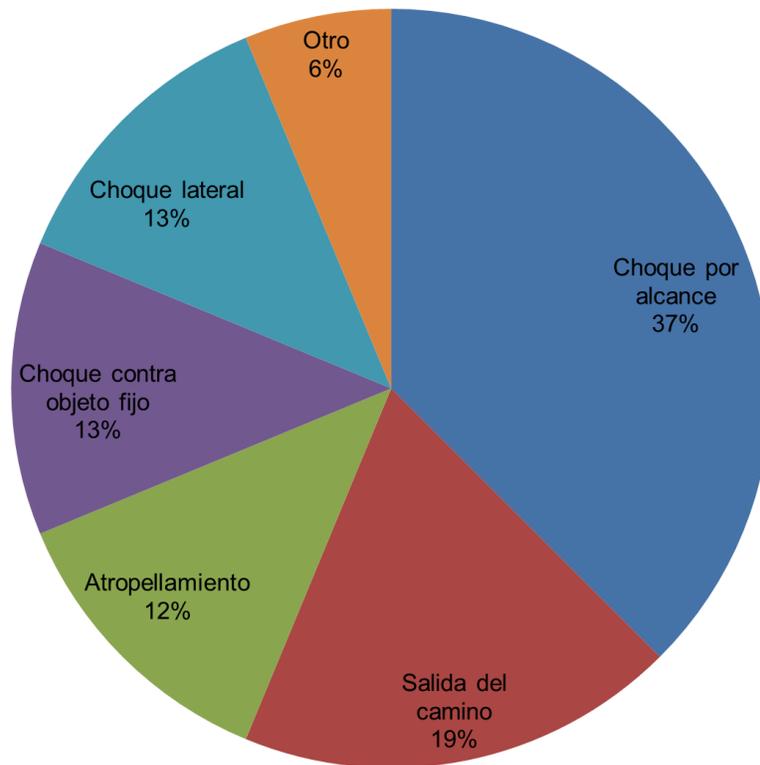


Figura 3.4 Tipo de accidentes reportados en el sitio 3 para el periodo 2012-2015

Adicionalmente a este análisis, se observa que son las salidas del camino el tipo de accidente que dejó como saldo la mayor cantidad de víctimas, reportando un muerto y tres lesionados para el periodo analizado, seguido por los choques por alcance y los atropellamientos, que dejaron un saldo de una persona muerta y una lesionada, en cada tipo (véase la tabla 3.6). Otro tipo de accidente que ocasionó víctimas fueron los choques contra objetos fijos. De igual forma que para los sitios anteriores, una vez identificados los principales tipos de accidentes, se analizará la infraestructura del sitio para determinar si existe influencia de ésta en la ocurrencia de dichos accidentes y poder proponer medidas de mejoramiento aplicadas a la infraestructura para disminuir la ocurrencia de este tipo de accidentes.

Tabla 3.4 Tipo de accidentes reportados en el sitio 2 y sus saldos, 2012-2015

Tipo de Accidente	Cantidad	Lesionados	Muertos
Choque por alcance	6	1	1
Salida del camino	3	3	1
Atropellamiento	2	1	1
Choque contra objeto fijo	2	1	0
Choque lateral	2	0	0
Otro	1	0	0
Total	16	6	3

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, los accidentes son multicausales, por lo que para el sitio 3 se tienen registradas un total de 16 causas para los 15 accidentes con información de las mismas, es decir para el 6.3% de los accidentes no se tiene información referente a las causas (un accidente). Los únicos dos factores reportados como causantes de los accidentes en este sitio son el conductor como responsable en el 75.0% de los casos y el vehículo en el restante 18.7% de los accidentes reportados en el sitio 3.

Respecto a las causas asociadas al conductor, la más frecuente es la velocidad excesiva. Al igual que en los sitios 1 y 2, la mayoría de las causas están asociadas al factor humano, motivo por el cual se busca encontrar soluciones para mejorar la infraestructura de forma que “perdone” el error humano con miras a reducir la accidentalidad y mitigar sus consecuencias.

A continuación se analizan otras características de cada sitio, tales como el tránsito que circula por los mismos y las velocidades que se desarrollan en las vías que los conforman.

3.2 Estudios de ingeniería de tránsito

Un concepto básico utilizado en la ingeniería de tránsito para mostrar la actividad vehicular en las carreteras es el volumen. El volumen vehicular se define como el número de vehículos que pasan por un lugar específico en una medida de tiempo; la forma de obtener dicha variable es por medio de conteos o aforos, ya sean manuales o automáticos [Cal y Mayor *et al.*, 2007]. El tránsito diario promedio anual (TDPA) es una medida de volumen vehicular que representa el número promedio diario de vehículos que pasan por determinado lugar para un año de estudio.

En la tabla 3.5 se muestra el TDPA y su distribución por tipo de vehículo para los sitios analizados. La información presentada en dicha tabla se obtuvo de los datos viales publicados por la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT. Debido a la colocación de las estaciones y a la cercanía de los sitios 1 y 2, únicamente se cuenta con un dato de TDPA para ambos sitios.

En la tabla 3.5 se observa que para el sitio 3 el TDPA se ha incrementado con el paso de los años; respecto a los tipos de vehículos, se observa un crecimiento en los vehículos ligeros, es decir que cada año se registra un incremento en la cantidad de automóviles y motocicletas en circulación por este tramo, mientras que en 2014 y 2015 se reporta un decremento significativo en el resto de vehículos en circulación por el tramo (por ejemplo, los autobuses que representaban aproximadamente el 6.5% de 2011 a 2013, se reducen a menos del 2% en los años subsecuentes), comportamiento que se repite para todos los vehículos de carga. En el tramo correspondiente a los sitios 1 y 2 se observa un crecimiento del tránsito diario promedio anual hasta 2014, con una ligera

disminución para el 2015. Respecto a la distribución por tipo de vehículo para este tramo, se mantiene una relación más constante en la que los vehículos ligeros (motos y automóviles) representan entre el 60 y el 70% de los vehículos.

Tabla 3.5 TDPA y su distribución por tipo de vehículo para los sitios analizados, 2011-2015

Sitio	Año	TDPA	CLASIFICACIÓN VEHICULAR (POR CIENTO)								
			M	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	Otros
3	2011	87,822	0.45	57.35	5.70	11.95	7.40	9.65	2.15	4.60	0.75
	2012	89,730	0.65	68.35	6.65	14.15	2.05	4.80	2.10	1.15	0.10
	2013	90,728	1.05	67.95	6.50	14.60	1.95	4.70	2.05	1.10	0.10
	2014	95,285	0.70	85.80	1.80	2.75	3.10	4.25	0.80	0.70	0.10
	2015	96,738	0.70	85.80	1.80	2.75	3.10	4.25	0.80	0.70	0.10
1 y 2	2011	48,952	0.55	59.45	4.70	7.75	7.50	13.45	1.65	4.35	0.60
	2012	52,706	1.25	61.45	5.95	8.15	4.50	11.00	3.30	3.70	0.70
	2013	57,324	1.30	62.60	6.05	7.70	4.60	10.15	3.40	3.60	0.60
	2014	60,948	1.30	65.60	3.85	6.25	5.65	12.80	1.40	2.60	0.55
	2015	59,577	0.00	68.80	4.80	5.50	3.15	9.95	3.85	3.00	0.95

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en el siguiente segmento se presenta el análisis de velocidades de punto para las velocidades medidas en cada punto de los tres sitios analizados.

3.3 Estudios de velocidad de punto

La velocidad se define como la relación entre la distancia que recorre un vehículo en una determinada cantidad de tiempo. La velocidad de los vehículos que circulan por una vía es uno de los parámetros más utilizados para el cálculo de la mayoría de los elementos de proyecto de un sistema vial.

De acuerdo con Cal y Mayor *et al.* (2007), “la velocidad debe ser estudiada, regulada y controlada con el fin de que origine un perfecto equilibrio entre el usuario, el vehículo y la vía, de tal manera que siempre se garantice la seguridad”.

La velocidad de punto de un vehículo cualquiera se define como la velocidad al momento de pasar por un determinado punto o sección transversal de una vía. Este parámetro permite medir las características de la velocidad en un lugar específico, bajo condiciones prevalecientes de tránsito y de las condiciones meteorológicas del sitio al momento de realizar el estudio. Para el caso del presente proyecto, con el análisis de velocidades de punto se busca determinar la relación de la velocidad de los vehículos con los conflictos presentes, además de su relación con la accidentalidad de los sitios estudiados, de forma que se puedan

proponer medidas de mejoramiento encaminadas a reducir la accidentalidad y sus causas.

Debido a la naturaleza de los sitios estudiados que, por tratarse de dos flujos vehiculares que convergen, es fundamental poder determinar la influencia de la velocidad en la accidentalidad y la cantidad de conflictos registrados en la zona, razón por la cual se caracterizan por separado ambos flujos, analizando las velocidades en dos puntos para cada sitio: uno correspondiente a la incorporación y el otro correspondiente a la vía principal (carril derecho de la carretera MEX-057).

Respecto a la cantidad adecuada de registros de velocidad que se deben analizar, Cal y Mayor *et al.* (2007) recomiendan algunos rangos para los parámetros determinantes, considerando para el presente estudio que, el número de registros de velocidad a medir para obtener un error menor que 2 km/h entre las medias de la muestra y la población, con un nivel de confiabilidad del 99.7%, es de 144 registros, por lo que los autores deciden redondear dicha cifra y medir la velocidad para 150 vehículos en cada punto de análisis.

A continuación se presenta el análisis de velocidades para los pares de puntos correspondientes a cada sitio bajo estudio.

3.3.1 Velocidades de punto para el sitio 1 (km 208+000 al 208+500)

Como se mostró en la figura 2.2, el sitio 1 corresponde a la incorporación del Boulevard Bernardo Quintana a la carretera MEX-057, mismo que está ubicado dentro de la zona urbana de la ciudad de Querétaro.

Los dos puntos donde se realizaron mediciones de la velocidad corresponden al punto 1 (P1) a la gaza de incorporación del Boulevard Bernardo Quintana, mientras que el punto 2 (P2) corresponde al carril derecho (carril de baja velocidad) de la carretera MEX-057. A continuación se analizan las velocidades de ambos puntos.

P1: Gaza de incorporación del Boulevard Bernardo Quintana

La gaza de incorporación consta de dos carriles y tiene un límite de velocidad de 40 km/h. En la figura 3.5 se presenta una vista general de la misma.

Mediante la toma de velocidades de punto en esta gaza, se observó que la mayoría de los vehículos que transitan por ella son ligeros, sin que se reporten vehículos de grandes dimensiones durante el periodo de tiempo en el que se recolectaron los datos. En la tabla 3.6 se presentan los datos de velocidad por tipo de vehículo.



Figura 3.5 Gaza de incorporación del Boulevard Bernardo Quintana a la carretera MEX-057

Tabla 3.6 Velocidades por tipo de vehículo para P1

Tipo de vehículo	Vehículos aforados	% Tipo vehículo	Velocidad (km/h)			Velocidad ponderada (km/h)
			Promedio	Mínima	Máxima	
A	143	95.3	64.5	45.0	83.0	64.3
Motos	1	0.7	62.0	62.0	62.0	
B	0	0.0	0.0	0.0	0.0	
C2	6	4.0	60.8	46.0	73.0	
C3	0	0.0	0.0	0.0	0.0	
T3 S2	0	0.0	0.0	0.0	0.0	
T3 S3	0	0.0	0.0	0.0	0.0	
T3 S2 R4	0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Otros	0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Total	150					

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla anterior se desprende que la muestra está compuesta por tres tipos de vehículos: automóviles ligeros, motocicletas y camiones de carga de dos ejes, siendo los tipo A o vehículos ligeros aquellos con una mayor participación en el tránsito de la gaza, además de ser el tipo de vehículo que registran la velocidad

mínima (45 km/h) y la máxima (83 km/h) de la muestra. La no presencia de otros tipos de camiones de carga de mayores dimensiones se debe al hecho de que la gaza proviene de una zona urbana en la que no está permitida la circulación de vehículos de tales dimensiones y capacidad. Se observa que la velocidad ponderada es de 64.3 km/h, misma que representa la velocidad esperada de cualquier vehículo elegido al azar, en el punto en estudio.

El análisis del comportamiento de la velocidad, independientemente del tipo de vehículo, se muestra en la figura 3.6.

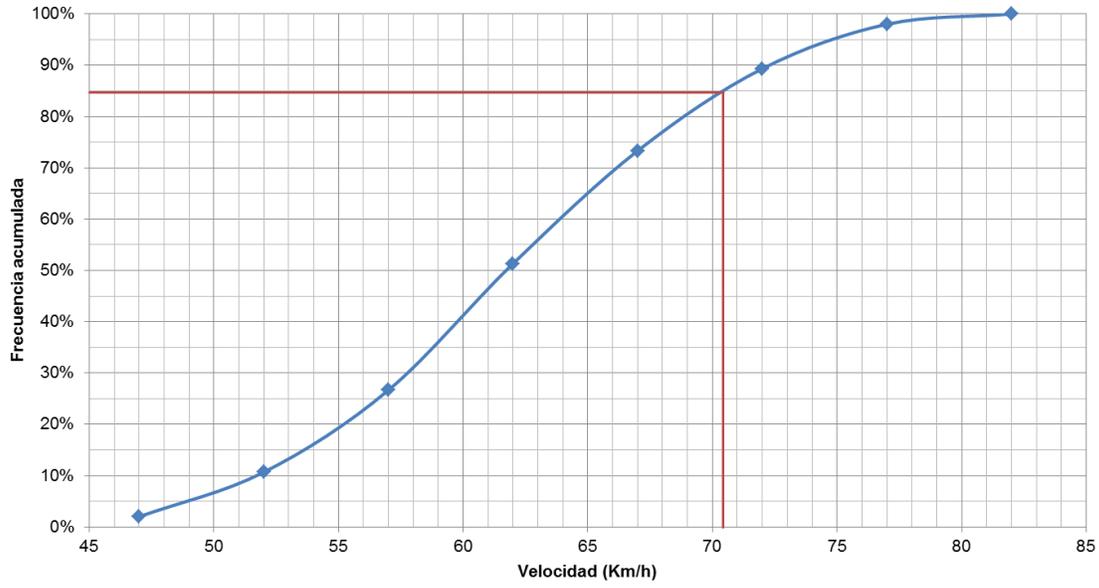


Figura 3.6 Histograma de frecuencias para P1

De los datos más representativos obtenidos del análisis de frecuencia se encuentra el percentil 85 de 71 km/h y el percentil 15 de 54 km/h, es decir, que el 85% de los vehículos viajan a 71 km/h o menos, mientras que sólo el 15% de los vehículos viajan a menor velocidad de 54 km/h a pesar que la gaza tiene un límite de 40 km/h.

Otro parámetro estadístico importante es la mediana, misma que se obtiene con el percentil 50 del histograma, siendo para este punto de 62 km/h, velocidad máxima a la que circulan el 50% de los vehículos analizados.

Con los análisis efectuados para el punto 1, se observa que la totalidad de los vehículos de la muestra circulan sobre el límite establecido, reportándose vehículos que circulan incluso al doble del límite, pudiendo este hecho incrementar la cantidad de conflictos al momento de incorporarse a la vía principal (carretera MEX-057).

P2: Carril derecho de la carretera MEX-057, km 208+000 al 208+500

La carretera MEX-057 cuenta con tres carriles en la zona de estudio del sitio 1, con un límite de velocidad de 80 km/h. En la figura 3.7 se presenta una vista general de la misma.



Figura 3.7 Carretera MEX-057, km 208+000 al 208+500, incorporación del Boulevard Bernardo Quintana

Mediante la toma de velocidades de punto en el carril derecho, por ser los vehículos que circulan por éste los que tienen interacción con aquellos que se incorporan de la gaza a la vía principal, se observó una mayor presencia de vehículos ligeros (Tipo A); sin embargo, a diferencia de la gaza, en este carril sí se reportan vehículos de carga articulados y doble articulados. De igual forma que para el P1, en la tabla 3.7 se presentan los datos de velocidad por tipo de vehículo.

En la tabla 3.7 se observa que la muestra se conforma de todos los tipos más comunes de vehículos en circulación en México, con una proporción de 60% vehículos ligeros, 7% autobuses y el restante 33% corresponde a vehículos de carga, en su mayoría de dos y tres ejes. La velocidad mínima (40 km/h) la reportó un vehículo tipo C3, es decir un vehículo de carga de tres ejes, mientras que la velocidad máxima registrada (106 km/h) corresponde a un vehículo tipo A. Al analizar la velocidad promedio por tipo de vehículo, no se observan grandes variaciones, es decir, la mayoría de los vehículos circula a velocidades mayores que los 70 km/h, sin importar si son ligeros, autobuses o de carga. Los vehículos doblemente articulados (T3S2R4), que representan el 3% de los vehículos

registrados, y los vehículos de tres ejes (C3) son los que reportan velocidades promedio menores que los 70 km/h. La velocidad esperada de cualquier vehículo en el carril derecho de la carretera MEX-057, a la altura de la incorporación del Boulevard Bernardo Quintana, es de 72.6 km/h.

Tabla 3.7 Velocidades por tipo de vehículo para P2

Tipo de vehículo	Vehículos aforados	%Tipo de vehículo	Velocidad (Km/h)			Velocidad ponderada (km/h)
			Promedio	Mínima	Máxima	
A	89	59.3	74.1	47.0	106.0	72.6
Motos	1	0.7	60.0	60.0	60.0	
B	10	6.7	70.4	49.0	95.0	
C2	17	11.3	72.0	41.0	91.0	
C3	12	8.0	68.8	40.0	96.0	
T3 S2	12	8.0	72.3	50.0	86.0	
T3 S3	5	3.3	70.4	58.0	86.0	
T3 S2 R4	4	2.7	64.8	50.0	82.0	
Otros	0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Total	150					

Fuente: Elaboración propia.

El análisis del comportamiento de la velocidad, independientemente del tipo de vehículo, se muestra en la figura 3.8.

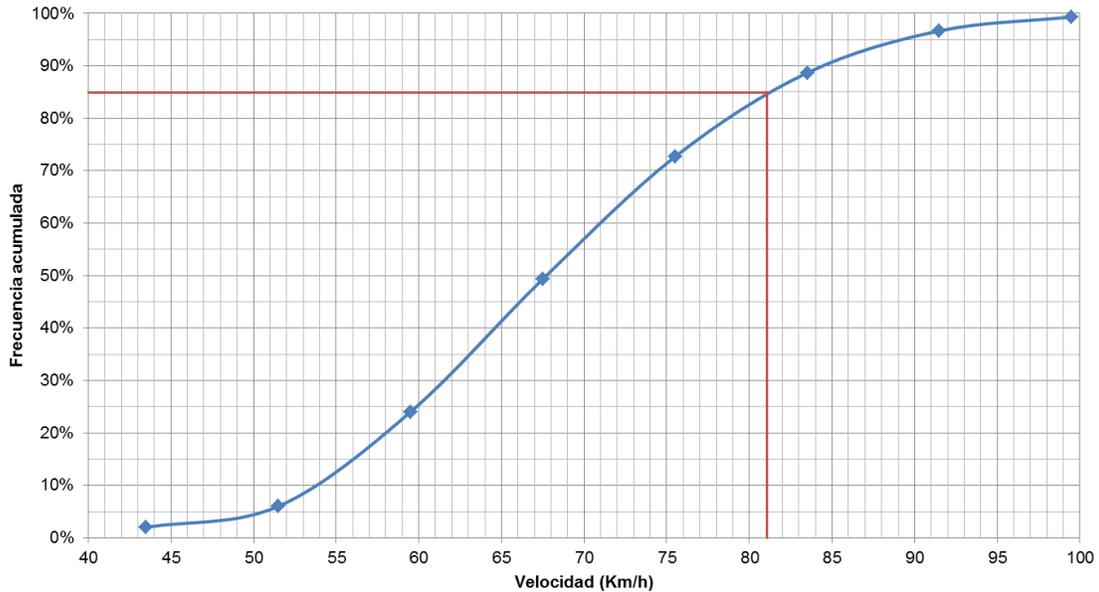


Figura 3.8 Histograma de frecuencias para P2

De los datos más representativos obtenidos del análisis de frecuencia, se encuentra el percentil 85 de 81 km/h y el percentil 15 de 56 km/h, es decir, que el

85% de los vehículos viajan a 81 km/h o menos, mientras que sólo el 15% de los vehículos viajan a menor velocidad de 56 km/h.

Otro parámetro estadístico importante es la mediana, misma que se obtiene con el percentil 50 del histograma, siendo para este punto de 68 km/h la velocidad máxima a la que circulan el 50% de los vehículos analizados.

3.3.2 Velocidades de punto para el sitio 2 (km 159+000 al 160+000)

Como se mostró en la figura 2.3, el sitio 2 corresponde a la incorporación de San Juan del Río a la carretera MEX-057 en el sentido México-Querétaro, mismo que está ubicado en las inmediaciones de la zona urbana de la ciudad de San Juan del Río.

Los dos puntos donde se realizaron mediciones de la velocidad corresponden al punto 3 (P3) a la gaza de incorporación de la zona urbana de San Juan del Río, mientras que el punto 4 (P4) corresponde al carril derecho (carril de baja velocidad) de la carretera MEX-057 a la altura del kilómetro 159+000 al 160+000. A continuación se analizan las velocidades de ambos puntos.

P3: Gaza de incorporación de San Juan del Río

La gaza de incorporación funciona como si tuviera dos carriles debido a que justo antes de la incorporación a la carretera MEX-057 presenta una unión del camino que viene de San Juan del Río y de la carretera a la Sierra Gorda de Querétaro, con un límite de velocidad de 40 km/h. En la figura 3.9 se presenta una vista general de la misma.



Figura 3.9 Gaza de incorporación de San Juan del Río a la carretera MEX-057

Mediante la toma de velocidades de punto en esta gaza, se observó que la mayoría de los vehículos que transitan por ella son ligeros, sin que se reporten vehículos doblemente articulados durante el periodo de tiempo cuando se recolectaron los datos. En la tabla 3.8 se presentan los datos de velocidad por tipo de vehículo.

Tabla 3.8 Velocidades por tipo de vehículo para P3

Tipo de vehículo	Vehículos aforados	% Tipo vehículo	Velocidad (km/h)			Velocidad ponderada (km/h)
			Promedio	Mínima	Máxima	
A	126	84.0	51.6	37.0	68.0	50.7
Motos	1	0.7	53.0	53.0	53.0	
B	5	3.3	46.8	44.0	50.0	
C2	7	4.7	49.3	42.0	60.0	
C3	3	2.0	46.0	43.0	50.0	
T3 S2	4	2.7	38.0	27.0	50.0	
T3 S3	4	2.7	43.5	35.0	51.0	
T3 S2 R4	0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Otros	0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Total	150					

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se observa que los vehículos ligeros (A y M) son aquellos con la mayor participación en el tránsito de la gaza y cuya presencia en la muestra representa el 84.7%, mientras que los autobuses representan el 3.3% y los vehículos de carga el 12% restante. Respecto a las velocidades registradas por tipo de vehículo, el vehículo ligero es el que reporta la máxima velocidad de la muestra, al registrar 68 km/h, mientras que la mínima velocidad reportada es de un vehículo articulado (T3S3) que viajaba a 35 km/h. La no presencia de vehículos doblemente articulados (T3S2R4) se debe al hecho de que la gaza proviene de una zona urbana en la que no está permitida la circulación de éstos. Se observa que la velocidad ponderada es de 50.7 km/h, misma que representa la velocidad esperada de cualquier vehículo elegido al azar, en el punto en estudio.

El análisis del comportamiento de la velocidad, independientemente del tipo de vehículo, se muestra en la figura 3.10.

De los datos más representativos obtenidos del análisis de frecuencia se encuentra el percentil 85 de 56 km/h y el percentil 15 de 41 km/h, es decir, que el 85% de los vehículos viajan a 56 km/h o menos, mientras que sólo el 15% de los vehículos viajan a menor velocidad de 41 km/h, a pesar del límite de 40 km/h establecido en la gaza.

Otro parámetro estadístico importante es la mediana, misma que se obtiene con el percentil 50 del histograma, siendo para este punto de 48 km/h, velocidad máxima a la que circulan el 50% de los vehículos analizados.

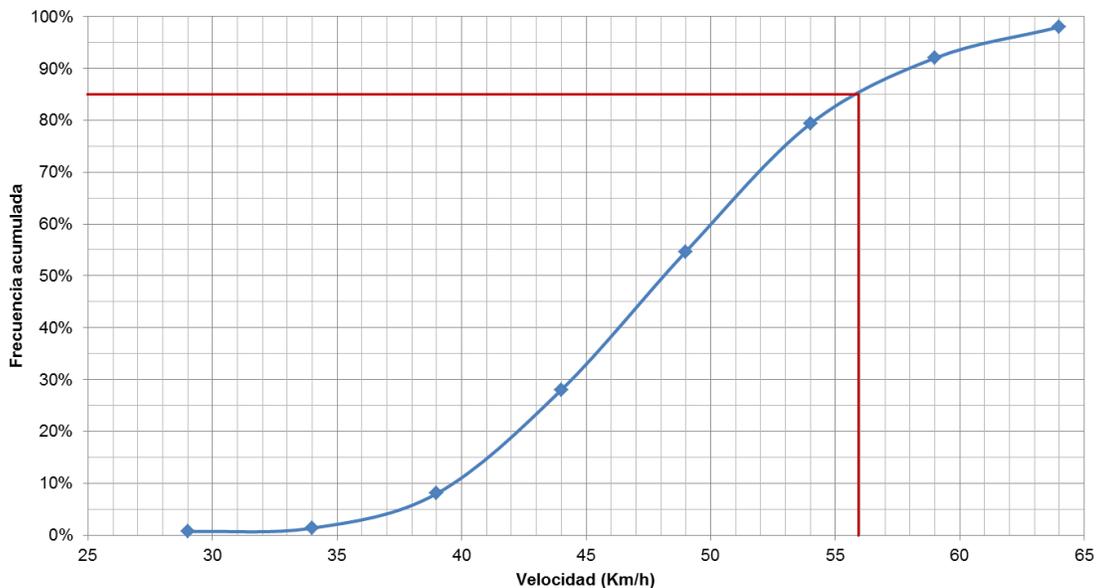


Figura 3.10 Histograma de frecuencias para P3

Como se mencionó anteriormente, previo a la intersección con la Carretera MEX-057 se localiza la incorporación de otra vía proveniente de la carretera San Juan del Río-Jalpan de Serra, misma que puede originar una disminución en la velocidad de los usuarios justo antes de incorporarse a la carretera MEX-057 y promover el funcionamiento tipo dos carriles de la gaza.

P4: Carril derecho de la carretera MEX-057, Km 159+000 al 160+000

La carretera MEX-057 cuenta con tres carriles en la zona de estudio del sitio 2 y tiene un límite de velocidad de 110 km/h. En la figura 3.11 se presenta una vista general de la misma.

Mediante la toma de velocidades de punto en el carril derecho, por ser los vehículos que circulan por éste los que tienen interacción con aquellos que se incorporan de la gaza a la vía principal, se observó una mayor presencia de vehículos ligeros (Tipo A); sin embargo, a diferencia de los puntos anteriores, los vehículos ligeros, en conjunto, representan menos del 50% de los vehículos totales. Para este punto, sí se reportan todos los tipos de vehículos de carga, incluido el doblemente articulado. De manera similar al análisis de los puntos anteriores, en la tabla 3.9 se presentan los datos de velocidad por tipo de vehículo.



Figura 3.11 Carretera MEX-057, km 159+000 al 160+000, incorporación de San Juan del Río

Tabla 3.9 Velocidades por tipo de vehículo para P4

Tipo de vehículo	Vehículos aforados	% Tipo vehículo	Velocidad (km/h)			Velocidad ponderada (km/h)
			Promedio	Mínima	Máxima	
A	49	32.7	83.7	60.0	110.0	80.4
Motos	1	0.7	80.0	80.0	80.0	
B	8	5.3	87.5	72.0	100.0	
C2	19	12.7	78.5	46.0	94.0	
C3	16	10.7	80.8	58.0	100.0	
T3 S2	32	21.3	78.5	40.0	104.0	
T3 S3	8	5.3	75.5	44.0	93.0	
T3 S2 R4	14	9.3	76.9	53.0	98.0	
Otros	3	2.0	69.7	65.0	73.0	
Total	150					

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla anterior se observa que la muestra incluye de todos los tipos más comunes de vehículos en circulación en México, con una proporción de 33.4% vehículos ligeros (tipo A y M), 5.3% de autobuses y el 61.3% restante corresponde a vehículos de carga, en su mayoría tipo T3S2 y vehículos unitarios. La velocidad mínima (40 km/h) la reportó un vehículo tipo T3S2, es decir un vehículo articulado de 5 ejes, mientras que la velocidad máxima registrada (110 km/h) corresponde a un vehículo tipo A. Al analizar la velocidad promedio por tipo de vehículo, no se observan grandes variaciones, es decir, la mayoría de los vehículos circula a velocidades mayores a los 75 km/h sin importar si son ligeros, autobuses o de carga. La velocidad esperada de cualquier vehículo en el carril derecho de la

carretera MEX-057 a la altura de la incorporación de San Juan del Río es de 80.4 km/h.

El análisis del comportamiento de la velocidad, independientemente del tipo de vehículo, se muestra en la figura 3.12.

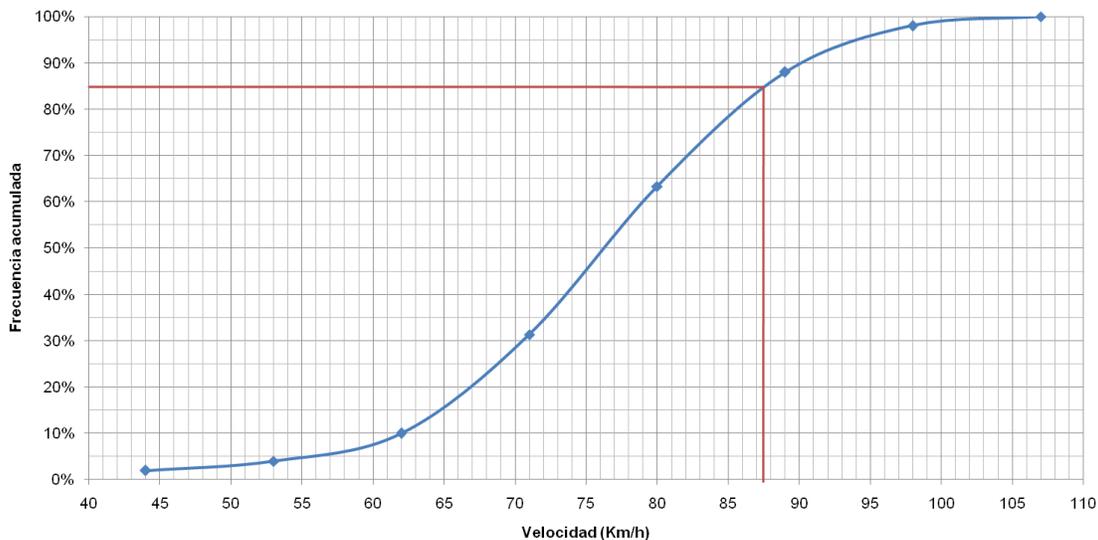


Figura 3.12 Histograma de frecuencias para P4

De los datos más representativos obtenidos del análisis de frecuencia, se encuentra el percentil 85 de 88 km/h y el percentil 15 de 65 km/h, es decir, que el 85% de los vehículos viajan a 88 km/h o menos, mientras que sólo el 15% de los vehículos viajan a menor velocidad de 65 km/h.

Otro parámetro estadístico importante es la mediana, misma que se obtiene con el percentil 50 del histograma, siendo para este punto de 76 km/h, velocidad máxima a la que circulan el 50% de los vehículos analizados.

3.3.3 Velocidades de punto para el sitio 3 (km 158+000 al 159+000)

Como se mostró en la figura 2.3, el sitio 3 corresponde a la incorporación a la carretera MEX-057 del retorno carretero ubicado a la altura de la primera salida al poblado de San Juan del Río, en el sentido México-Querétaro.

Para este sitio se planteó el levantamiento de mediciones de velocidad en dos puntos: el punto 5 (P5) correspondiente a la gaza de incorporación del retorno, y el punto 6 (P6) correspondiente al carril derecho (carril de baja velocidad) de la tangente sobre la carretera MEX-057, a la altura del kilómetro 158+000 al 159+000.

Una vez en el sitio 3, se inició la toma de mediciones de velocidad de los vehículos que circulaban por el carril derecho de la carretera MEX-057 del kilómetro 158+000 al 159+000, donde en aproximadamente una hora se aforaron los 150 registros estipulados como meta. A la par de este levantamiento de datos, se observaron aquellos vehículos que circulaban por la gaza retorno, siendo evidente el bajo aforo de la misma ya que en dicho periodo de una hora únicamente se registraron cuatro vehículos.

En vista del bajo aforo registrado en el retorno, y debido a la naturaleza del presente estudio, en el que, entre otras cosas, se busca cuantificar la cantidad de conflictos registrados en intersecciones, se decide que no se tomará en cuenta el sitio 3 para el presente estudio.

4 Inspección de seguridad vial

Las agencias responsables de identificar los problemas viales y subsanar las deficiencias de la infraestructura vial tradicionalmente identifican el problema de acuerdo con las estadísticas de los accidentes viales. Estas estadísticas se procesan y analizan, y posteriormente se emite un juicio sobre los puntos en los que se registró el mayor número de accidentes. Estos puntos se denominan comúnmente “puntos negros”.

Sin embargo, aunque los registros de los accidentes que se presentan en infraestructura vial (intersecciones, distribuidores, rampas de acceso y de incorporación, etc.) son los elementos principales para medir la seguridad vial de las carreteras y autopistas, existen varias razones por las cuales no es conveniente utilizar únicamente los accidentes ocurridos como medida para describir la condición de seguridad vial. Uno de los problemas es que si el número de accidentes ocurrido en un sitio específico es usualmente bajo, éste no se identifica como un punto negro, pero puede representar un riesgo a considerar por el diseño de la infraestructura.

Existen varios estudios que afirman que los análisis basados solamente en reportes de accidentes no son un buen indicativo del estado de seguridad de las instalaciones viales y se dificulta el proponer medidas de mejoramiento (St-Aubin *et al.*, 2013; Elvik y Vaa, 2004; Berntman, 2003; Englund *et al.*, 1998).

De lo anterior se puede deducir que, sin el entendimiento de los procesos que motivan los accidentes y cuál es el rol del diseño de la infraestructura existente, es muy difícil proponer medidas de mejoramiento para alterar de manera positiva el comportamiento de los conductores en el evento de un accidente. Por ello, en el presente trabajo se propone complementar el análisis de accidentalidad de los sitios seleccionados con otras metodologías que refuerzan el entendimiento de la participación de la infraestructura vial en el incremento de la seguridad vial de los sitios analizados.

En el presente capítulo se describe el proceso de inspección de seguridad vial realizado en los sitios seleccionados, así como los principales problemas identificados y la propuesta de medida de mejoramiento. Con base en los problemas detectados y en las medidas de mejoramiento propuestas en el presente capítulo, así como en las observaciones de operación de los sitios ya planteadas, en el capítulo 5 se utiliza una herramienta de simulación para evaluar la efectividad de algunas medidas de mejoramiento propuestas.

4.1 Descripción del proceso realizado para la inspección de seguridad vial

La inspección de seguridad vial (ISV), realizada en los sitios 1 y 2, incluyó una visita a campo —llevada a cabo el 6 de septiembre del 2016—, cuyo objetivo era recoger datos mediante un vehículo de inspección. Asimismo, se verificaron algunas mediciones en campo, necesarias para corroborar información de diversas observaciones realizadas durante la inspección en gabinete, tales como los anchos de carriles, anchos de acotamientos, zonas laterales, etc. La visita de campo corrió a cargo del equipo de inspección conformado por personal de la Coordinación de Seguridad y Operación del Transporte del IMT.

En la visita de campo, se realizaron varios recorridos del tramo en estudio, en un vehículo de inspección a baja velocidad, sin interrumpir el tránsito vehicular que circulaba por la carretera, para identificar los riesgos potenciales que aparecen sobre la carretera y pueden traer consecuencias fatales a los usuarios de la vía. Estos recorridos se realizaron en horario diurno. Por medio del vehículo de inspección se obtuvo una recolección de datos de video georreferenciados. A partir de la información recolectada y con el uso del programa “Hawkeye Processing Toolkit Version 4.0”, se observaron en gabinete marcos fotográficos en tramos de 10 m cada uno a lo largo de toda la vía. Estos marcos muestran las vistas de las cámaras central, derecha, izquierda y trasera (figura 4.1).

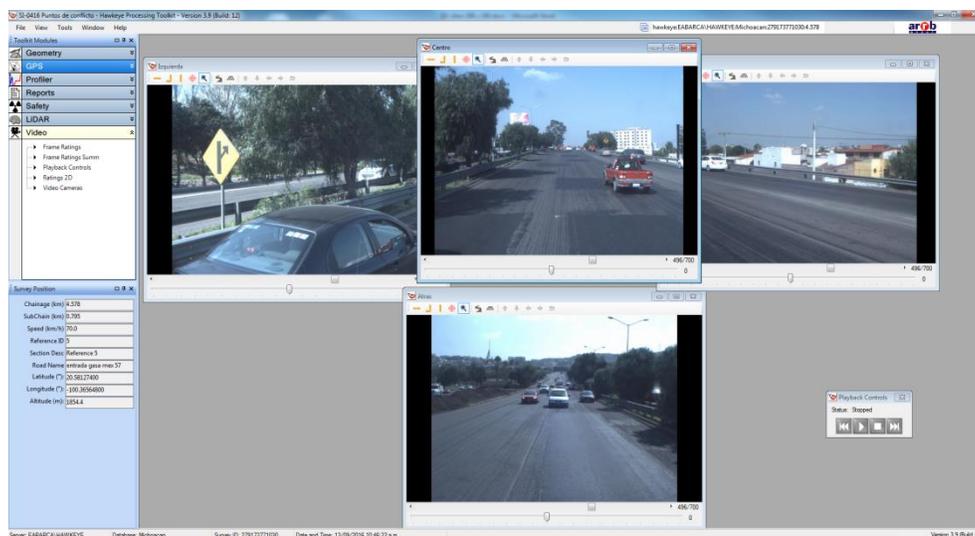


Figura 4.1 Ejemplo de marco fotográfico correspondiente a un tramo inspeccionado

4.2 Principales hallazgos, observaciones mayormente detectadas y medidas de mejoramiento propuestas

Las observaciones realizadas durante el proceso de codificación están principalmente relacionadas con los siguientes elementos: zonas de entrecruzamiento, sistemas de contención, severidad lateral tanto izquierda como derecha (es decir, todo lo registrado dentro de la franja de 9 m de ancho de la zona lateral adyacente al arroyo vial de la carretera que debe estar despejada), así como el señalamiento vertical y horizontal.

4.2.1 Principales hallazgos

Para el sitio 1, la principal problemática encontrada es la que se refiere a la zona de entrecruzamiento (ZE).

La ZE se define como el cruce de dos o más corrientes de tránsito que viajan en la misma dirección, a lo largo de una cierta longitud de carretera sin la ayuda de dispositivos para el control del tránsito. Así, las ZE se forman cuando segmentos de convergencia son seguidos a corta distancia por segmentos de divergencia. “A corta distancia” implica que no hay distancia suficiente entre los segmentos de divergencia y convergencia para que operen independientemente [MPGC, 2016]. En la figura 4.2 se muestra una imagen del sitio 1 en donde se aprecia la ZE, destacada con un recuadro.



Figura 4.2 Zona de entrecruzamiento en el sitio 1

Tres son las características geométricas que afectan las operaciones de una ZE: longitud, ancho y configuración. Todas tienen impacto en la maniobra de cambio de carril, que es la característica operativa distintiva de una ZE (MPGC, 2016).

De las mediciones en campo se comprueba que la longitud efectiva de la ZE es de 230 m; el ancho del carril auxiliar es de 6 m; el ancho del carril de baja es de 3.3 m, y presenta una configuración de segmentos de convergencia y divergencia de un solo lado, con carril auxiliar tipo paralelo.

La operación de una ZE se caracteriza por la velocidad de flujo libre de la zona y en las proporciones de flujo de demanda para cada movimiento dentro de una ZE (p.ej. rampa a autopista o rampa a rampa).

En la figura 4.3 se aprecia la sección transversal de la ZE, en donde se muestran las anchuras de los carriles y el alineamiento vertical; también se puede observar que la ZE se ubica una curva en cresta limitando ligeramente la visibilidad.

Las características de operación observadas en el sitio registraron una serie de conflictos que abarcan posibles choques por alcance y laterales.



Figura 4.3 Sección transversal de la zona de entrecruzamiento

De lo observado en la visita de campo, la revisión del video, los resultados de los análisis de accidentes y la revisión geométrica del sitio, se confirma que las fallas operativas del sitio se deben fundamentalmente a la corta distancia (230 m) de la longitud de la ZE, lo que implica que no hay distancia suficiente entre los segmentos de divergencia y convergencia para que operen independientemente. En términos de los alcances de este trabajo, la medida de mejoramiento propuesta

para este sitio se basará fundamentalmente en el aumento de la longitud de la zona de entrecruzamiento.

Para el sitio 2, la principal problemática encontrada es la que se refiere al carril de aceleración (CA).

Un carril de aceleración es una franja auxiliar, incluidas sus áreas de ampliación, construido primordialmente para los vehículos que ingresan en una carretera. El término "carril de aceleración" se refiere a la anchura adicional que permite a los vehículos cambiar su velocidad para pasar de la velocidad de operación de la vía que abandonan a la velocidad de operación de la vía a la que ingresan. Un carril de aceleración será suficientemente ancho y largo para que los conductores puedan ajustar su velocidad acelerando antes de ingresar a la vialidad a la que desean incorporarse (MPGC, 2016).

En la figura 4.4 se muestra una imagen del sitio 2 donde se aprecia el CA, destacado con un recuadro.



Figura 4.4 Carril de aceleración en el sitio 2

La observación colectiva ha comprobado algunas características operativas a considerar en un CA (MPGC, 2016), a saber:

- No todos los conductores utilizan los carriles de aceleración de la misma manera.
- Algunos aprovechan poco la longitud disponible; sin embargo, se ha observado que su utilización es suficiente para mejorar la seguridad y operación de una carretera.

- Los CA que cuentan con una zona larga de ampliación gradual y transición se ajustan mejor al comportamiento de los conductores.

La longitud de un carril de aceleración se basa en la combinación de cuatro factores:

1. La velocidad a la cual los conductores entran al carril de aceleración.
2. La velocidad a la cual los conductores convergen con el tránsito principal.
3. La manera de acelerar o los factores de aceleración.
4. Los volúmenes relativos del tránsito directo y del que se va a incorporar.

Las características geométricas de esta CA, medida en campo, presenta un ancho del carril auxiliar de 4 m y una longitud de 140 m sin transición.

El *Manual de proyecto geométrico de carreteras* (MPGC, 2016) indica que un carril de aceleración —para las características operativas que presenta el sitio 2— debe ser del orden de los 350 m. Se cree entonces que los problemas operativos presentados en el sitio 2, tales como choques por alcance y laterales, indicados en el análisis de accidentes, se deben primordialmente a la corta distancia de este CA. En la figura 4.5 se presenta una imagen del sitio 2 en donde se observa la operación actual del carril de aceleración.



Figura 4.5 Operación actual del carril de aceleración en el sitio 2

Es importante mencionar que los vehículos pesados generalmente requieren distancias mayores para acelerar e incorporarse a la corriente principal del tránsito. La comprobada presencia de un número considerable de vehículos pesados en el sitio 2, haciendo uso de la entrada de un camino de alta velocidad, justifica la necesidad de incrementar la longitud del carril de aceleración. Por ello, en términos de los alcances de este estudio, la medida de mejoramiento propuesta

es la de incrementar la longitud del carril de aceleración a 370 m, considerando en este valor una longitud de transición.

4.2.2 Observaciones mayormente detectadas

De acuerdo con la *Guía de diseño de zonas laterales* (RSDG, por sus siglas en inglés) de la Asociación Estadounidense de Dependencias Estatales de Carreteras y Transportes (*American Association of State Highway and Transportation Officials*, AASHTO), la “zona lateral despejada” se define como el “área total del borde de la carretera, empezando por el borde del camino recorrido, disponible para el uso seguro por vehículos errantes. Esta área puede consistir de un acotamiento, un talud recuperable, un talud no recuperable y/o una clara zona despejada” (AASHTO, 2011). Esto se traduce en que, si se cuenta con zonas laterales despejadas, puede incrementarse la probabilidad de que en caso de presentarse, por ejemplo, una salida del camino, el conductor pueda detenerse con seguridad, o bien, recuperar el control del vehículo que ha salido, lo que tendrá como resultado una recuperación segura en lugar de un accidente, y con ello se estaría mitigando la severidad de los accidentes ocurridos. De acuerdo con la RSDG, diversos estudios han indicado que en las autopistas de alta velocidad con un considerable TDPA, un ancho de 9 metros o más desde el borde del camino recorrido permite que alrededor del 80% de los vehículos que salen de control fuera de la vía puedan recuperarse. Es por ello que, para efectos del presente estudio, se considera una zona lateral despejada de 9 m de ancho.

Las observaciones más recurrentes encontradas se centran principalmente en cuatro atributos:

1. sistema de contención
2. severidad lateral
3. señalamiento vertical
4. señalamiento horizontal

En las tablas 4.1 y 4.2, se encuentran las observaciones más recurrentes para los sitios 1 y 2. Ambas tablas están estructuradas de manera similar, en las cuales la columna 1 contiene el nombre del atributo para el cual la observación fue realizada; la columna 2 indica la categoría del hallazgo respecto a cada atributo, y la columna 3 muestra la frecuencia de la observación para la categoría indicada de

cada atributo, además de encontrarse ordenadas de mayor a menor según la frecuencia con que se presentaron.

Tabla 4.1 Atributos con mayor número de observaciones en el sitio 1

Atributo	Categoría	Frecuencia
Severidad lateral	Poste	20
	Árbol	8
	Total	28
Sistema de contención	Obstrucción del sistema	3
	Barrera averiada	2
	Transición inadecuada	2
	Inicio de barrera sin protección	1
	Longitud insuficiente	1
	Bifurcación sin protección	1
	Total	10
Señalamiento horizontal	Falta de señal	5
	Confuso	1
	Total	6
Señalamiento vertical	Falta de señal	3
	Total	3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2 Atributos con mayor número de observaciones en el sitio 2

Atributo	Categoría	Frecuencia
Sistema de contención	Longitud insuficiente	5
	Inicio de barrera sin protección	2
	Barrera averiada	1
	Transición inadecuada	1
	Obstrucción del sistema	1
	Deficiente	1
	Total	11
Señalamiento horizontal	Requiere conservación	3
	Falta de señal	2
	Confuso	1
	Total	6
Severidad lateral	Árbol	2
	Poste	1
	Corte peligroso	1
	Total	4
Señalamiento vertical	Falta de señal	2
	Requiere conservación	1
	Total	3

Fuente: Elaboración propia.

En las tablas anteriores se puede observar que en el sitio 1 (tabla 4.1), los hallazgos más recurrentes son los que se refieren al atributo de la severidad lateral, en donde la presencia de postes y árboles adyacentes a la vía representan la mayor frecuencia de elementos de riesgo para los usuarios, seguida de problemas referentes a deficiencias en los sistemas de contención, fallas en el señalamiento horizontal y, por último, fallas en el señalamiento vertical.

En el sitio 2 (tabla 4.2), los hallazgos más frecuentes son los asociados a los sistemas de contención, en donde la longitud insuficiente de las barreras metálicas y la falta de protección en los inicios de las barreras son las fallas más comunes; las fallas en el señalamiento horizontal, seguidas de los hallazgos encontrados en las zonas laterales (postes y árboles) y fallas en el señalamiento vertical son los elementos de la vía que requieren intervención para el mejoramiento de la seguridad vial de este sitio.

4.3 Medidas de mejoramiento propuestas

A continuación se presentan y describen ilustrativamente algunas de las principales observaciones realizadas durante el proceso de ISV en gabinete, así como las medidas de mejoramiento particulares relacionadas con éstas, para ambos sitios.

4.3.1 Severidad lateral

La figura 5.6 corresponde a la rama de incorporación del sitio 1, en la cual se observan obstáculos como postes y árboles muy cercanos al arroyo vial.



Figura 4.6 Hallazgos en las zonas laterales en el sitio 1

La figura 4.7 corresponde a los carriles centrales de la autopista del sitio 2, en la cual se observa un poste sin protección de más de 10 cm de diámetro, que representa un riesgo potencial para los usuarios.



Figura 4.7 Hallazgos en las zonas laterales en el sitio 2

La medida de mejoramiento propuesta para la observación realizada en las figuras 4.6 y 4.7 consiste en la remoción de los árboles y la reubicación de los postes, o en su caso, en la instalación de un elemento de contención para protegerlos.

4.3.2 Sistema de contención

La figura 4.8 corresponde a la rama de incorporación del sitio 1, en la cual se observa un inicio de barrera metálica sin protección.



Figura 4.8 Inicio de barrera sin protección, sitio 1

La figura 4.9 corresponde al sitio 2, después del carril de aceleración, en la cual se observa un inicio de barrera metálica sin protección en la entrada de un acceso irregular.



Figura 4.9 Inicio de barrera sin protección y acceso irregular, sitio 2

La medida de mejoramiento propuesta para este hallazgo en las figuras 4.8 y 4.9 consiste en colocar una sección de amortiguamiento al inicio de la barrera metálica, ejemplo de las cuales se muestra en la figura 4.10.



Figura 4.10 Ejemplo de sección de amortiguamiento para barreras metálicas

La figura 4.11 corresponde a la incorporación en el sitio 1, muy cerca de la zona de entrecruzamiento, en la cual se observa que la barrera lateral metálica se encuentra impactada.



Figura 4.11 Sistema de contención impactado, sitio 1

La figura 4.12 corresponde al carril de aceleración en el sitio 2, en la cual se observa que la barrera lateral metálica se encuentra impactada.



Figura 4.12 Sistema de contención impactado, sitio 2

La medida de mejoramiento propuesta para la observación realizada en las figuras 4.11 y 4.12 consiste en reemplazar el tramo de sistema de contención impactado, para que éste pueda cumplir con su función adecuadamente.

La figura 4.13 corresponde a la zona de entrecruzamiento del sitio 1, en la cual se observa la realización de una transición inadecuada entre los diferentes sistemas de contención de la vía.



Figura 4.13 Transición inadecuada entre sistemas de contención, sitio 1

La figura 4.14 corresponde al sitio 2, antes del carril de aceleración, en la cual se observa la realización de una transición inadecuada entre los diferentes sistemas de contención de la vía.



Figura 4.14 Transición inadecuada entre sistemas de contención, sitio 2

La medida de mejoramiento propuesta para la observación realizada en las figuras 4.13 y 4.14 consiste en colocar una transición adecuada entre un sistema de contención rígido y uno flexible a la orilla del camino; es decir, es necesario que la conexión cuente, entre otras cosas, con su respectiva zapata de conexión para poder realizar una repartición adecuada de cargas entre el sistema de conexión rígido y el flexible, tal como lo ilustra la figura 4.15 obtenida de la NOM-037 referente a barreras de protección en carreteras (SCT, 2012). Para obtener un mayor detalle de la transición, puede consultarse directamente dicha normativa en su apartado “6. Barreras de transición”.

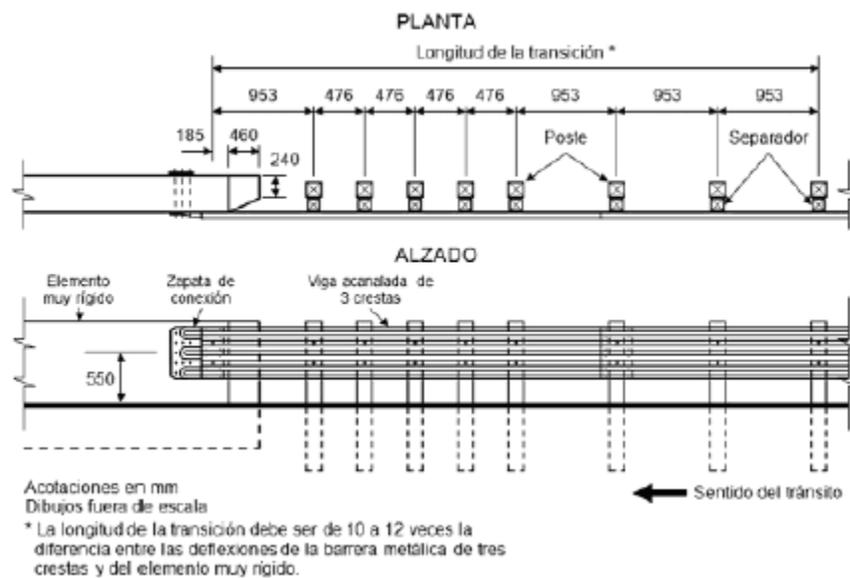


Figura 4.15 Transición y conexión adecuadas entre sistemas de contención

La figura 4.16 corresponde al sitio 2, antes del carril de aceleración. En dicha figura se observa la terminación de una barrera de concreto en parapeto de puente, sin continuidad de barrera lateral metálica.



Figura 4.16 Terminación de una barrera de concreto en parapeto de puente, sin continuidad de barrera lateral metálica, sitio 2

La medida de mejoramiento propuesta para la observación realizada en la figura 4.16 consiste en instalar y conectar un sistema de contención como una barrera metálica, como se ilustra en la figura 4.17. Se sugiere de manera general prolongar el sistema de contención cuando se tengan distancias de entre 50 y 100 metros con el objeto de ofrecer continuidad en el sistema.



Figura 4.17 Instalación y conexión de barrera metálica al parapeto del puente, sitio 2

La figura 4.18 corresponde al sitio 2, después del carril de aceleración, en la cual se observa que el espacio disponible entre el objeto fijo (postes de arco de control

de velocidad) y la barrera metálica lateral es menor que el ancho de trabajo requerido para que el sistema de contención trabaje correctamente.



Figura 4.18 Ancho de trabajo entre los postes y la barrera metálica menor al requerido para que el sistema trabaje correctamente, sitio 2

La medida de mejoramiento propuesta para la observación realizada en la figura 4.18 consiste en evitar la colocación a futuro de un sistema de contención cercano a objetos fijos, debido a que el sistema no funciona adecuadamente, al no contar con un ancho de trabajo adecuado; en caso de que llegaran a existir objetos fijos cercanos al sistema de contención, se requiere colocar los postes de las barreras a distancias menores que las establecidas de manera general en la normativa (SCT, 2012), para con ello rigidizar el sistema, disminuir el ancho de trabajo y permitir que el sistema funcione adecuadamente.

La figura 4.19 corresponde al sitio 1, en la rampa, antes de la zona de entrecruzamiento, en la cual se observa que la altura del sistema de contención es inconsistente, al encontrarse por debajo de la altura reglamentaria.

La medida de mejoramiento propuesta para la observación realizada en la figura 4.19 consiste en renivelar todo el sistema de contención a la altura reglamentaria, o bien, puede evaluarse la factibilidad de instalar una barrera de tres crestas.



Figura 4.19 Altura inconsistente del sistema de contención, sitio 1

4.3.3 Señalamiento horizontal

La figura 4.20 corresponde al sitio 1, en la incorporación de la rampa a la autopista, en la cual se observa que carece de las rayas canalizadoras.

Las rayas canalizadoras tienen como finalidad delimitar la trayectoria de los vehículos, encauzando el tránsito en las entradas, salidas y bifurcaciones, o separar apropiadamente los sentidos de circulación, formando una zona neutral de aproximación a las isletas o fajas separadoras, como se muestra en la figura 4.21.



Figura 4.20 Falta de rayas canalizadoras, sitio 1

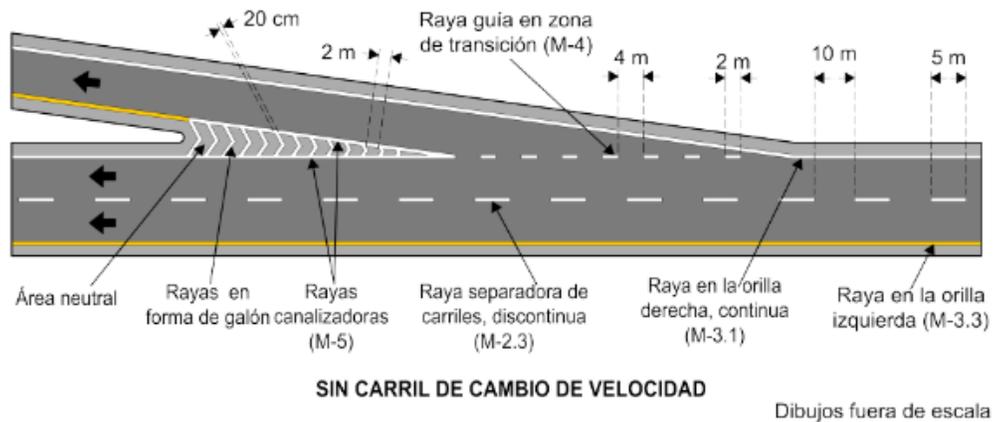


Figura 4.21 Rayas separadoras de carriles, rayas guía en zonas de transición, rayas canalizadoras y rayas en la orilla del arroyo vial

La figura 4.22 corresponde al sitio 2, en la incorporación de la rampa a la autopista, al inicio de carril de aceleración, en la cual se observa que ya no se aprecian las rayas canalizadoras.



Figura 4.22 Falta de conservación de las rayas canalizadoras, sitio 2

La medida de mejoramiento propuesta para la observación realizada en las figuras 4.20 y 4.22 consiste en colocar las rayas canalizadoras tal y como lo estipulan los lineamientos descritos en la NOM-034-SCT2-2011 Señalamiento horizontal y vertical de carreteras y vialidades urbanas.

La figura 4.23 corresponde al sitio 1, en la rampa, en la cual se observa falta de conservación de las rayas del alineamiento horizontal.



Figura 4.23 Falta de conservación de las rayas del señalamiento horizontal, sitio 1

La medida de mejoramiento propuesta para la observación realizada en la figura 4.23 consiste en pintar y mejorar los programas de conservación rutinaria del señalamiento horizontal con base en lo estipulado en los lineamientos descritos en la NOM-034-SCT2-2011 Señalamiento horizontal y vertical de carreteras y vialidades urbanas.

4.3.4 Señalamiento vertical

La figura 4.24 corresponde al sitio 2, en la rampa de incorporación, antes del carril de aceleración, en la cual se observa falta de conservación y mantenimiento del señalamiento vertical.

La medida de mejoramiento propuesta para la observación realizada en la figura 4.24 consiste en mejorar los programas de conservación rutinaria del señalamiento vertical con base en lo estipulado en los lineamientos descritos en la NOM-034-SCT2-2011 Señalamiento horizontal y vertical de carreteras y vialidades urbanas.



Figura 4.24 Falta de conservación y mantenimiento del señalamiento vertical, sitio 2

Además de las medidas de mejoramiento propuestas, han de considerarse las siguientes recomendaciones. Aunque algunas ya se mencionaron, dada su importancia y la frecuencia con la que se presentaron durante el proceso de la ISV, es necesario enunciarlas de nuevo:

- ◆ Revisar el *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad* (DGST, 2014), la NOM-008-SCT2-2013 (SCT, 2013), la NOM-034-SCT2-2011 (SCT, 2011), la NOM-036-SCT2-2009 (SCT, 2009), la NOM-037-SCT2-2012 (SCT, 2012) y la NOM-086-SCT2-2015 (SCT, 2016), según corresponda, antes de colocar o instalar marcas, señalamientos o dispositivos de seguridad vial.
- ◆ Evaluar la instalación de una terminación al inicio o final de un sistema de contención, ya sea que se coloque una sección de amortiguamiento, o bien, se prolongue el sistema y se ancle al talud de corte.
- ◆ Analizar la factibilidad de cambiar los tramos que tengan sistemas de contención de dos crestas a un sistema de tres crestas, para ofrecer mayor seguridad a los vehículos de mayores dimensiones y pesos (vehículos de carga).
- ◆ Prolongar el sistema de contención cuando se tengan distancias de entre 50 y 100 metros con el objeto de ofrecer una continuidad en el sistema.
- ◆ Colocar las transiciones adecuadas entre los sistemas de contención rígidos y flexibles.

- ◆ Colocar los adaptadores adecuados para unir las barreras metálicas de dos crestas con las barreras metálicas de tres crestas.
- ◆ Realignar verticalmente el bordillo con la barrera metálica. Se sugiere ir realizando esta medida cuando se realicen tareas de sustitución de una barrera metálica impactada.
- ◆ Evitar la colocación a futuro de un sistema de contención cercano a objetos fijos, debido a que el sistema, al no contar con un ancho de trabajo adecuado, no funciona adecuadamente; en caso de que llegaran a existir objetos fijos cercanos al sistema de contención, se requiere colocar los postes de las barreras a distancias menores que las establecidas de manera general en la normativa [3], para con ello rigidizar el sistema, disminuir el ancho de trabajo y permitir que el sistema funcione adecuadamente.
- ◆ Antes de la instalación del señalamiento vertical, verificar que sea el idóneo.
- ◆ Corregir la altura y la ubicación lateral de todas las señales bajas verticales que corresponda. Esto obedece a que anteriormente la normativa mencionaba que la altura del señalamiento vertical tenía que estar a 1.50 m sobre el hombro de la carretera; sin embargo, actualmente la normativa señala, en cuanto a ubicación, que las señales deben estar a una altura de 2.50 m; en cuanto a la ubicación lateral, la orilla interior del tablero debe quedar a una distancia mínima de 0.50 m respecto al hombro de la carretera y nunca a más de 1.50 m. Por lo tanto, se sugiere que en su momento se corrijan la altura y la ubicación lateral de todas las señales bajas verticales que se encuentren ubicadas de manera diferente a lo normado.
- ◆ Revisar la retroreflexión de los botones de división de sentidos de circulación y de orilla de calzada a lo largo de las dos carreteras e identificar los faltantes. Se sugiere realizar esta revisión durante el periodo nocturno.
- ◆ Evaluar y, en su caso, cerrar o habilitar correctamente los accesos irregulares.
- ◆ Contar con un programa de conservación tanto periódica como rutinaria que garantice una vía segura.

Si bien existen diversos dispositivos para incrementar la seguridad vial, las recomendaciones particulares formuladas como resultado de la ISV buscan incrementar la seguridad de los usuarios del camino.

5 Estimación de los beneficios de las medidas de mejoramiento propuestas a través de la microsimulación

Como se mencionó anteriormente, las agencias de transporte se enfocan en la seguridad de las instalaciones viales a su cargo a través de los registros históricos de accidentes como principal herramienta de análisis; sin embargo, existen otras metodologías que pueden contribuir al análisis de la seguridad vial de una vía, sin que estén relacionadas con la cantidad de accidentes registrados. Es el caso de los análisis sustitutos de la accidentalidad (ASA), que buscan establecer un índice de seguridad para alguna instalación o punto de la vialidad sin basarse en datos de accidentes ocurridos y tienen la finalidad de satisfacer las siguientes necesidades (Gettman,2008):

- Es necesario poder evaluar la seguridad de las instalaciones viales sin tener que esperar a que datos estadísticos “anormales” o “relativamente altos” se presenten en dicho punto.
- Existe también la necesidad de poder evaluar un diseño experimental de carreteras e instalaciones viales antes de su construcción, así como estrategias operativas sobre la infraestructura actualmente en funcionamiento sin tener que implementarlas en campo.

Los ASA consideran variables tales como tiempos de viaje, velocidades de aproximación, longitudes de cola y porcentajes de vueltas izquierdas, entre otros (Gettman y Head, 2003). Dentro de este tipo de enfoque para el análisis de la accidentalidad prevalece la técnica de análisis de conflictos, misma que data de los años 1960 (Perkins, 1969).

Como su nombre lo indica, esta técnica se centra en los conflictos vehiculares entre los vehículos de la vialidad. Define, en primer lugar, un conflicto como una situación observable en la que dos o más usuarios de la vialidad se aproximan entre sí en tiempo y espacio, de tal manera que se producirá una colisión si sus movimientos continúan sin cambio (Amundsen y Hyden, 1977). De acuerdo con esta definición, una colisión siempre es precedida por un conflicto de tráfico; sin embargo, muchas veces los conflictos no se desarrollan de manera para que ocurra una colisión, ya que al menos uno de los dos usuarios involucrados toma una acción evasiva. Aun así, los conflictos pueden aportar mucha información acerca de los accidentes que se presentan en las carreteras, ya que el proceso de desencadenamiento del accidente es un conflicto de tráfico. Se dispone de estudios que han demostrado la existencia de una estrecha relación entre

accidentes y conflictos vehiculares. Lo anterior se cumple ya que el proceso entre accidentes y conflictos graves es idéntico.

De acuerdo con Older y Shippey (1979) cualquier conflicto puede describirse como “una serie de eventos con una finita probabilidad de convertirse en accidente”. En la figura 5.1 se muestra la diferencia entre conflictos y encuentros seguros, en los cuales el curso de la colisión se transforma en conflicto de tráfico cuando existe una acción evasiva, y un encuentro seguro se presenta cuando la maniobra se realiza de manera normal, es decir, sin acciones evasivas.

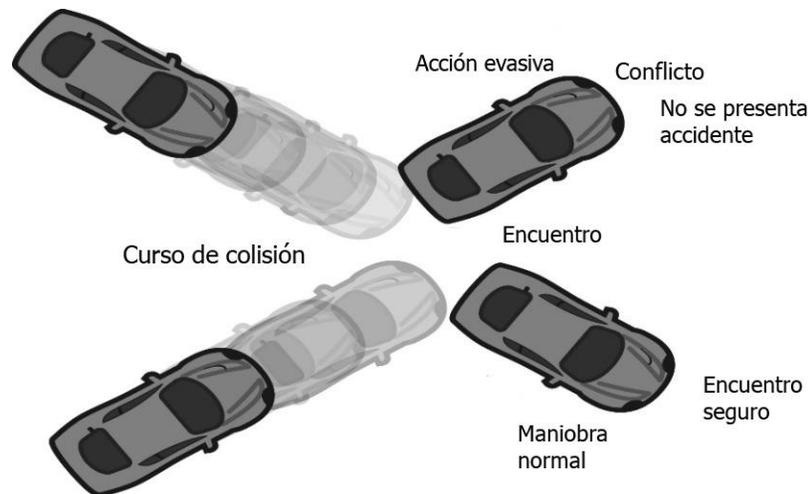


Figura 5.1 Conflictos con potencial de convertirse en accidentes y encuentros seguros

La técnica de análisis de conflictos se basa en las trayectorias de los vehículos de la vialidad, que hasta hace algunos años eran recopiladas de manera manual por observadores colocados en la vialidad en estudio. Actualmente es posible coleccionar las trayectorias de los vehículos a través de programas de microsimulación de tránsito. De acuerdo con la Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos (FHWA, por sus siglas en inglés, 2003), los accidentes suelen ser muchas veces casuales (o aleatorios), lo cual en la mayoría de las ocasiones suele alentar el proceso de análisis de un sitio en estudio y realizar las recomendaciones pertinentes. Ante este hecho, la FHWA desarrolló un software denominado Surrogate Safety Assessment Model (SSAM), el cual combina la microsimulación de tráfico y el análisis automatizado de conflictos de tráfico, analizando la frecuencia y el tipo de conflictos presentados.

En este caso, se utilizó un modelo de microsimulación de tránsito dentro del software “VISSIM” 5.30, para poder simular los conflictos que se presentan en los sitios de estudio elegidos. Este modelo toma como base la relación que existe entre conflictos y accidentes entre vehículos, de ahí la necesidad de recopilar datos necesarios para la realización del modelo que relaciona los conflictos que se presentan en los sitios de estudio y los accidentes (únicamente entre vehículos) reportados en la zona.

Para utilizar este modelo de simulación se debe contar con cierta información:

- Definición de los sitios. En el capítulo 3 del presente estudio se definieron los sitios a estudiar, y se describen sus principales características de operación (TDPA y velocidades de punto) y accidentalidad.
- Recopilación de datos geométricos. Es necesario contar con datos geométricos de las vialidades a analizar. En la literatura se estipula que estos datos pueden estimarse mediante fotografías satelitales u ortofotos; sin embargo, este tipo de medidas suele ser aproximada y no se toman en cuenta datos geométricos de elevación. Por ello, para el presente estudio se utilizó el levantamiento hecho con el vehículo Hawkeye, propiedad del IMT, mismo que está equipado con GPS y un odómetro, de manera que es posible obtener la geometría de las gazas y las vías principales a través de posicionamiento global, así como datos de pendientes y anchos de carriles.
- Toma de video. Para poder realizar un modelo que asemeje las condiciones de operación de los sitios analizados, se grabó un video sobre la vía para poder obtener los parámetros necesarios para la microsimulación. Una vez procesada la información en gabinete, se realizaron las tomas de los dos sitios durante una hora cada uno, con ayuda de una cámara de video montada sobre un monopié. Es importante recalcar que, como se está realizando un estudio de microsimulación, los datos requeridos para poder llevar a cabo un estudio con esta escala son de mayor alcance y más detallados, por lo que en los siguientes apartados se muestra la metodología para la obtención de datos.

5.1 Obtención de datos para la microsimulación

Como se mencionó anteriormente, para realizar un modelo que asemeje las condiciones de operación del sitio analizado es necesario recabar determinada información de los videos obtenidos en campo. En las figuras 5.2 y 5.3 se muestran imágenes de las tomas realizadas en los sitios 1 y 2, respectivamente.



Figura 5.2 Vista de la toma de video del sitio 1



Figura 5.3 Vista de la toma de video del sitio 2

A continuación se describe el proceso para la obtención de datos a partir del video.

Datos de los vehículos

Como primer punto, se realizó una recopilación de los modelos y configuraciones vehiculares que circulan por los sitios en estudio. La identificación se realizó con base en la inspección visual del video. En las siguientes tablas (5.1 a 5.4) se muestran las configuraciones vehiculares y tipos de vehículos que más circularon por los puntos analizados, así como sus características geométricas (ancho y largo). Cabe mencionar que, para efectos de análisis en la simulación, podemos agrupar varios tipos de vehículos por su operación (por ejemplo, vehículos tipo sedán, compactos y SUV pueden agruparse en un solo conjunto).

Tabla 5.1 Longitudes y anchos de vehículos tipo sedán y compactos

Vehículo	Longitud (m)	Ancho (m)	Vehículo	Longitud (m)	Ancho (m)
Spark	3.64	1.59	Passat	4.47	1.84
Chevy	3.58	1.61	Maxima	4.84	1.86
March	3.82	1.67	Beetle	4.29	1.81
Gol	3.9	1.65	New Polo	3.97	1.68
Tsuru	4.33	1.65	Focus	4.53	1.82
Jetta GLI	4.62	1.78	Fusion	4.87	1.85
Sentra	4.63	1.76	Fiesta	4.41	1.98
Golf GTI	4.26	1.8	Mustang	4.78	1.88
Tiida	4.47	1.7	Accord	4.88	1.85
Crossfox	4.08	1.69	Camry	4.81	1.82
Jetta Clásico	4.4	1.74	Challenger	5.02	1.92
Versa	4.49	1.7	Camaro	4.83	1.92
Altima	4.86	1.83	Sonyc	4.4	1.74
Audi A1	3.95	1.75	Seat Toledo	4.48	1.71
Matiz	3.49	1.5	Vento	4.38	1.7

Fuente: Fichas técnicas de vehículos ligeros tipo sedán.

Tabla 5.2 Longitudes y anchos de vehículos tipo Pick-up y SUV

Vehículo	Longitud (m)	Ancho (m)	Vehículo	Longitud (m)	Ancho (m)
Ranger	5.35	1.85	EcoSport	4.24	1.77
Hilux	5.25	1.84	Patriot	4.42	1.76
L200	5.3	1.75	Silverado	5.22	2.03
Frontier	5.01	1.72	Tacoma	5.29	1.90
Lobo	5.89	2.01	Trax	4.52	1.70
Tundra	5.81	2.03	Captiva	4.25	1.78
F150	5.42	2.01	Journey	4.58	1.85
Ram 1500	5.31	2.01	CV-R	4.58	1.83
Cheyene	5.22	2.03	Voyager	4.81	1.82
NP300	4.96	1.93	Edge	4.68	2.00
Suburban	5.69	2.05	Cherokee	4.63	1.93
NV350	5.23	1.88	Hiace	5.38	1.90

Fuente: Fichas técnicas de vehículos ligeros tipo SUV.

Tabla 5.3 Longitudes y anchos de autobuses

Vehículo	Longitud (m)	Ancho (m)
DINA Run 8	8.17	2.5
DINA Run 9	9.35	2.5
MB Torino	10.90	2.5
Intercontinental	10.01	2.4
Urbano 40	8.52	2.5
Urbano 50	9.43	2.5
Suburbano	8.80	2.5

Fuente: Fichas técnicas de vehículos ligeros tipo sedán.

Tabla 5.4 Longitudes y anchos de autobuses

Vehículo	Longitud (m)	Ancho (m)
C2	14.0	2.9
C3	14.0	2.9
T3-S2	23.0	2.6
T3-S2-S4	31.0	2.6

Fuente: NOM-012.

En algunos casos no se pudo identificar el modelo de vehículo que circulaba. Asimismo, se omitieron algunos modelos de vehículos con características geométricas similares.

Aforo

Además de recabar las longitudes de los vehículos, es necesario recopilar datos de los volúmenes de tránsito de cada tipo de vehículo, para los puntos en estudio. Como se mencionó anteriormente, es posible agrupar cierto tipo de vehículos en función de su operación. En este caso, se agruparon los vehículos en los tres tipos más comunes: ligero (A), de pasajeros (B) y de carga (C). Los conteos de vehículos se realizaron en rangos de 10 minutos.

Para el sitio 1, en las tablas 5.5 y 5.6 se muestran los datos del conteo de vehículos a partir del video para el P1 y P2, respectivamente.

Tabla 5.5 Conteo de vehículos en P1

Intervalo de tiempo (minutos)	Tipo de vehículo	Conteo de vehículos
00:00 - 10:00	A	333
	B	0
	C	13

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.5 Conteo de vehículos en P1 (continuación)

Intervalo de tiempo (minutos)	Tipo de vehículo	Conteo de vehículos
10:00 - 20:00	A	336
	B	1
	C	10
20:00 - 30:00	A	355
	B	5
	C	16
30:00 - 40:00	A	357
	B	0
	C	12
40:00 - 50:00	A	300
	B	0
	C	14
50:00 - 1:00:00	A	367
	B	0
	C	12

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.6 Conteo de vehículos en P2

Intervalo de tiempo (minutos)	Tipo de vehículo	Conteo de vehículos
00:00 - 10:00	A	349
	B	22
	C	94
10:00 - 20:00	A	326
	B	19
	C	91
20:00 - 30:00	A	347
	B	21
	C	99
30:00 - 40:00	A	347
	B	16
	C	82
40:00 - 50:00	A	359
	B	16
	C	102

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.6 Conteo de vehículos en P2 (continuación)

Intervalo de tiempo (minutos)	Tipo de vehículo	Conteo de vehículos
50:00 - 1:00:00	A	356
	B	17
	C	80

Fuente: Elaboración propia.

De igual forma, para el sitio 2, en las tablas 5.7 y 5.8 se muestran los datos del conteo de vehículos a partir del video para P3 y P4, respectivamente.

Tabla 5.7 Conteo de vehículos en P3

Intervalo de tiempo (minutos)	Tipo de vehículo	Conteo de vehículos
00:00 - 10:00	A	82
	B	1
	C	17
10:00 - 20:00	A	98
	B	2
	C	13
20:00 - 30:00	A	75
	B	3
	C	13
30:00 - 40:00	A	75
	B	3
	C	13
40:00 - 50:00	A	75
	B	3
	C	13
50:00 - 1:00:00	A	75
	B	3
	C	13

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.8 Conteo de vehículos en P4

Intervalo de tiempo (minutos)	Tipo de vehículo	Conteo de vehículos
00:00 - 10:00	A	176
	B	15
	C	75
10:00 - 20:00	A	145
	B	8
	C	64
20:00 - 30:00	A	158
	B	8
	C	65
30:00 - 40:00	A	158
	B	8
	C	65

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.8 Conteo de vehículos en P4 (continuación)

Intervalo de tiempo (minutos)	Tipo de vehículo	Conteo de vehículos
40:00 - 50:00	A	173
	B	7
	C	70
50:00 - 1:00:00	A	124
	B	9
	C	61

Fuente: Elaboración propia.

Entrecruzamientos

Otro de los aspectos críticos a considerar es el del entrecruzamiento de vehículos en el sitio 1, específicamente sobre P1. En la figura 5.4 se muestra un croquis del sitio 1 y los principales elementos analizados dentro del video.



Figura 5.4 Croquis del sitio 1 y los puntos de decisión, entrecruzamiento y posibles puntos de destino

Con base en el croquis mostrado, se espera tener entrecruzamientos de rama (gaza)-autopista y autopista-rama, como se muestra en la figura 5.5.

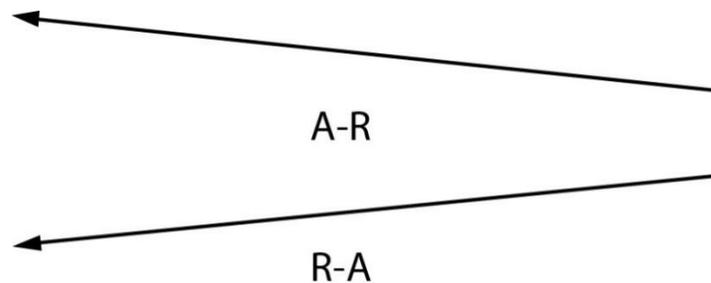


Figura 5.5 Croquis del P1 y los puntos de decisión, entrecruzamiento y posibles puntos de destino

Los datos de entrecruzamiento se muestran en segmentos de 10 minutos en la tabla 5.9.

Tabla 5.9 Conteo de entrecruzamiento por tipo de vehículo en P1

Intervalo de tiempo (minutos)	Rama - autopista		Autopista - rama	
	Tipo de vehículo	Conteo	Tipo de vehículo	Conteo
00:00 - 10:00	A	117	A	22
	B	0	B	3
	C	4	C	2
10:00 - 20:00	A	127	A	22
	B	0	B	1
	C	7	C	4
20:00 - 30:00	A	136	A	21
	B	2	B	0
	C	5	C	2
30:00 - 40:00	A	118	A	24
	B	0	B	1
	C	2	C	1
40:00 - 50:00	A	92	A	25
	B	0	B	1
	C	0	C	1
50:00 - 1:00:00	A	105	A	16
	B	0	B	0
	C	3	C	0

Fuente: Elaboración propia.

5.2 Microsimulación de los sitios

Una vez procesados los datos obtenidos mediante el video, es necesario introducirlos en el programa de simulación VISSIM, versión 5.30.

Para realizar las simulaciones, se tomó como base la lista de puntos a considerar que se encuentra en el manual de usuario (PTV, 2011). Con base en esa lista, se configuraron los parámetros de la simulación para el sitio 1 y 2, como se muestra en las figuras 5.6 y 5.7, respectivamente.

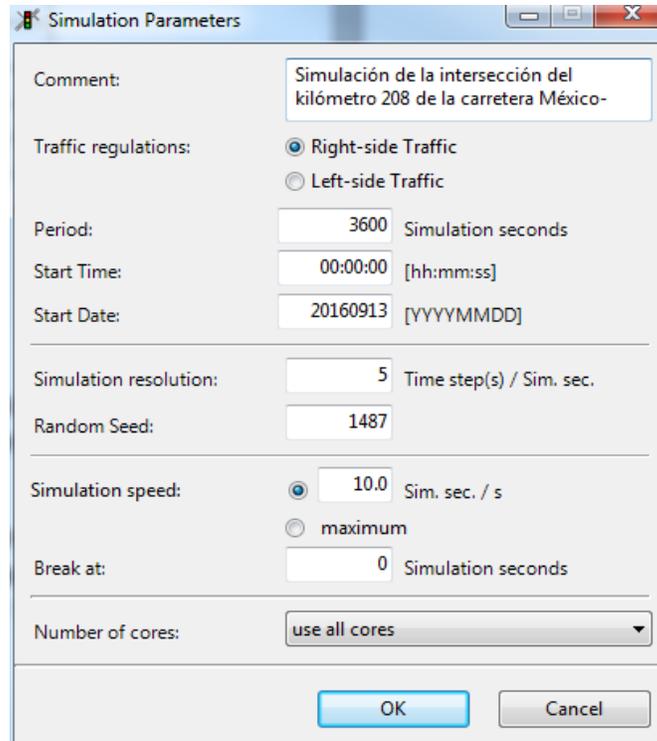


Figura 5.6 Configuración de los parámetros de la simulación del sitio 1

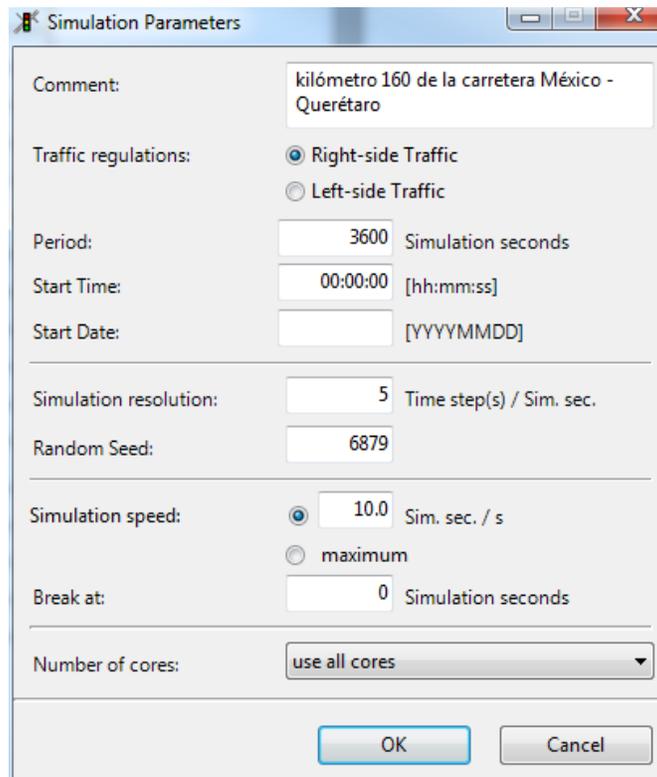
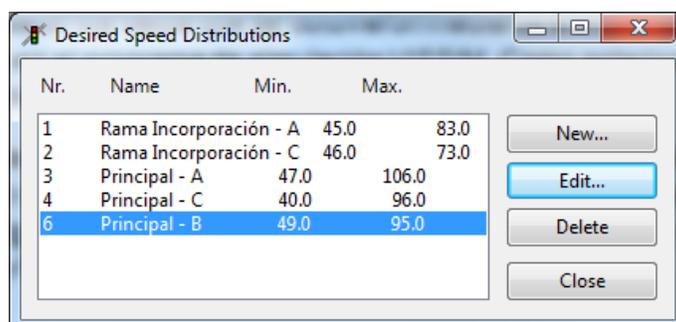


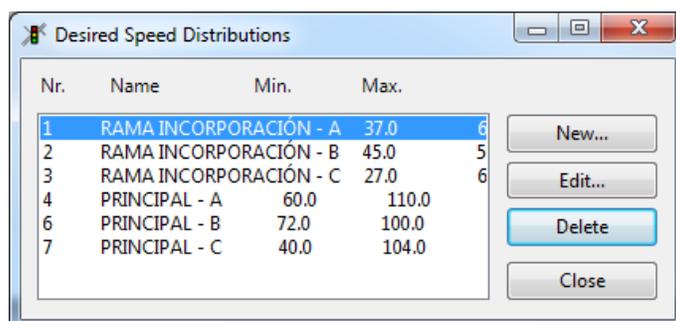
Figura 5.7 Configuración de los parámetros de la simulación del sitio 2

Una vez configurados los parámetros de la simulación, el siguiente paso consiste en crear perfiles de velocidad de los vehículos. En las siguientes figuras se muestran los perfiles creados para cada sitio y para cada conjunto de vehículos creados (A, B y C).



Nr.	Name	Min.	Max.
1	Rama Incorporación - A	45.0	83.0
2	Rama Incorporación - C	46.0	73.0
3	Principal - A	47.0	106.0
4	Principal - C	40.0	96.0
6	Principal - B	49.0	95.0

Figura 5.8 Perfiles de velocidad por tipo de vehículo del sitio 1



Nr.	Name	Min.	Max.
1	RAMA INCORPORACIÓN - A	37.0	6
2	RAMA INCORPORACIÓN - B	45.0	5
3	RAMA INCORPORACIÓN - C	27.0	6
4	PRINCIPAL - A	60.0	110.0
6	PRINCIPAL - B	72.0	100.0
7	PRINCIPAL - C	40.0	104.0

Figura 5.9 Perfiles de velocidad por tipo de vehículo del sitio 2

Estos perfiles se generaron a partir de la información de velocidades recabada en campo. Se agruparon las velocidades por frecuencias y por tipos de vehículos. En la figura 5.10 se muestra un ejemplo de cómo se ingresan las velocidades.

Con apego al manual, el siguiente paso es editar las características geométricas de los vehículos. En este caso, se utilizan los mismos tipos de vehículos en ambos puntos, ya que se encontraron los mismos tipos de vehículos en ambos sitios. En la figura 5.11 se muestran los tipos de vehículos generados en función de las dimensiones contenidas en las fichas técnicas de algunos modelos que circularon por los sitios analizados.

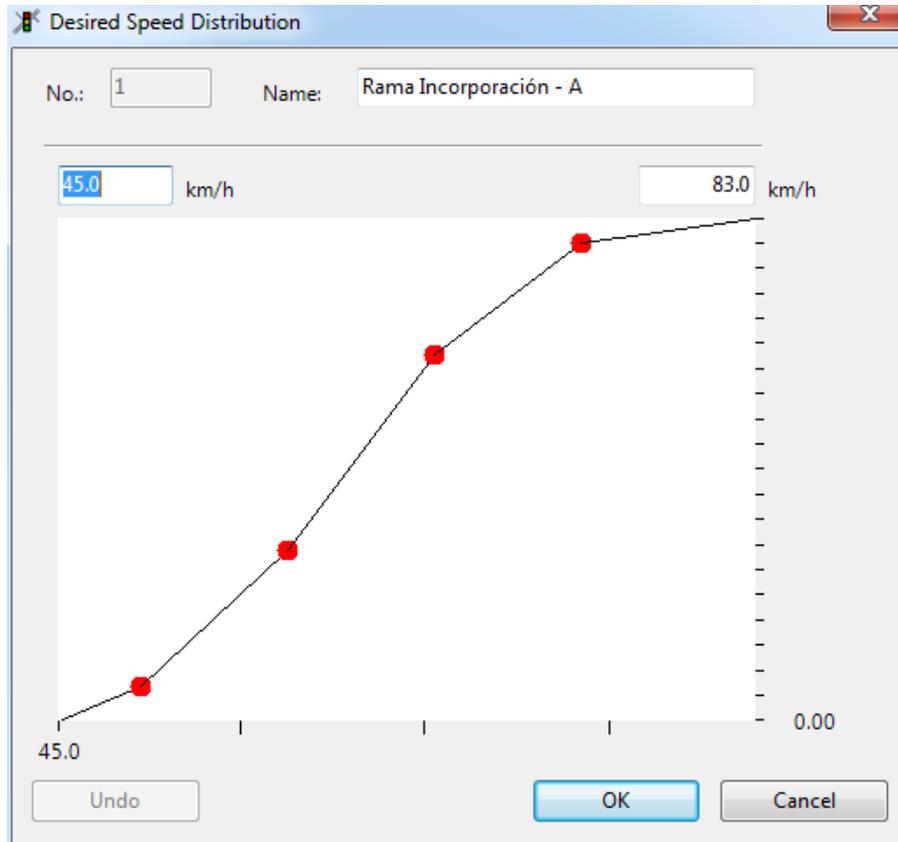


Figura 5.10 Gráfica de distribución de velocidades para los vehículos tipo A del sitio 1

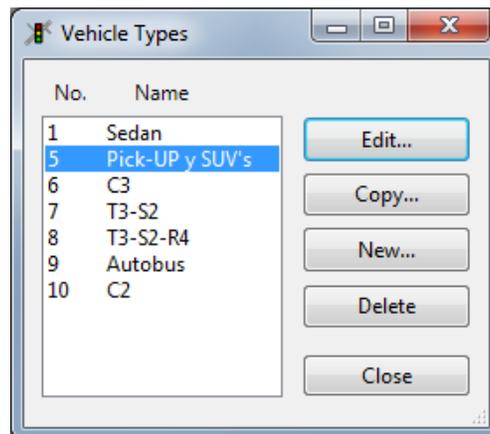


Figura 5.11 Tipos de vehículos creados para la simulación de los sitios

En cada uno de los tipos de vehículos, mostrados en la Figura 5.11, se crearon clases con las frecuencias de los largos de los vehículos. De esa manera, se asegura que el programa simule las características geométricas de la mayoría de los vehículos que circulan por los sitios en estudio.

Estos tipos de vehículos se agruparon seguidamente para crear composiciones de vehículos. De esta manera, se agruparon los vehículos tipo sedán, pick-ups y SUV

en el composición de vehículos ligeros (denotados por la letra A); el tipo de vehículo de los autobuses corresponde a la composición de los vehículos de pasajeros (denotados por la letra B); y la composición de vehículos pesados se conforma por los tipos de vehículos C2, C3, T3-S2, T3-S2-R4 (denotados por la letra C). En la figura 5.12 se muestran las composiciones de vehículos creadas para las simulaciones de los sitios.

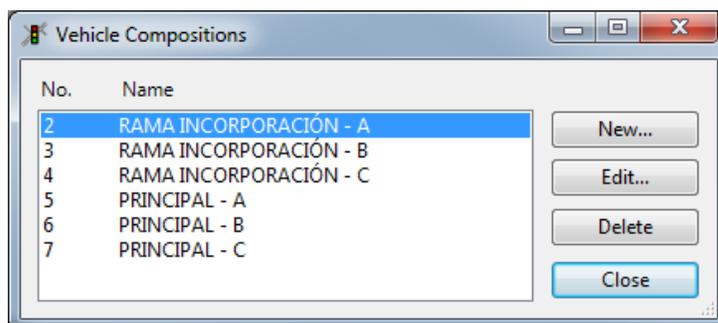


Figura 5.12 Tipos de vehículos creados para la simulación de los sitios

Como se puede apreciar en la figura anterior, se crearon dos composiciones de vehículos distintas de cada tipo de vehículo, ya que las velocidades en la rama (gaza de incorporación) y la autopista son diferentes para un mismo tipo de vehículo.

Con estos datos cargados, se puede comenzar a trazar la red con base en el levantamiento elaborado con el vehículo Hawkeye. Este levantamiento se guardó en formato shape y se importó al programa VISSIM para proceder a trazar la intersección; además, se incorporó una imagen satelital para tener mejor referencia de los sitios analizados (véanse las figuras 5.13 y 5.14).

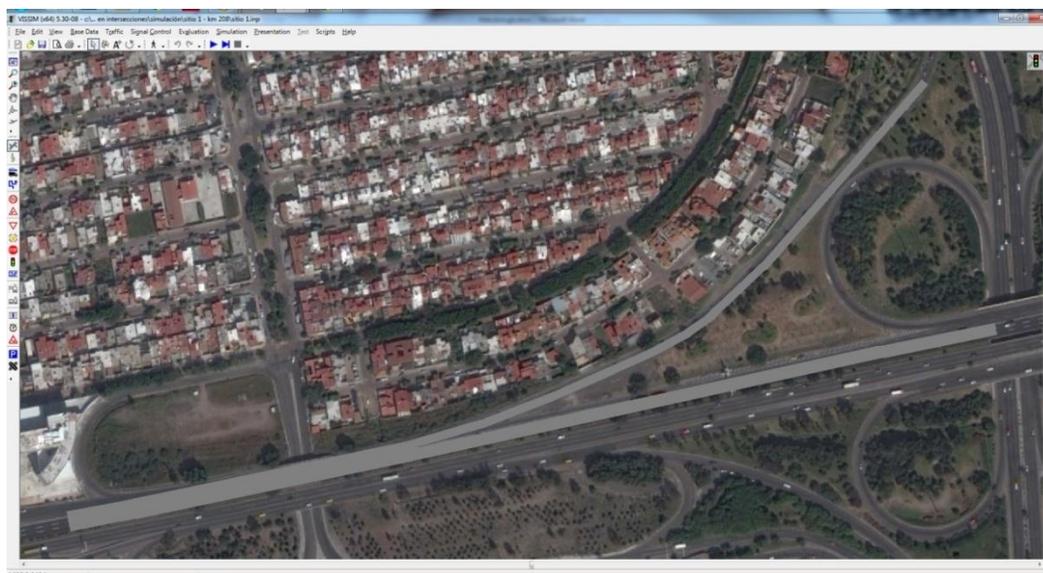


Figura 5.13 Creación de la red vial del sitio 1



Figura 5.14 Creación de la red vial del sitio 2

Al crear la red vial, se complementa la geometría con datos sobre el número de carriles, anchos de carriles y pendientes. Asimismo, se añadieron los datos de volúmenes por cada 10 minutos en cada intersección y se añadieron puntos de decisión en el sitio 1, en donde se tienen entrecruzamientos hacia dos destinos.

Para poder simular adecuadamente la operación de los vehículos en las intersecciones, se añadieron zonas de reducción de velocidad para simular lo más posible a la realidad el cambio de velocidad que se presenta en la zona de incorporación rama-autopista.

5.3 Calibración y validación de la simulación

Para poder realizar el análisis de conflictos que se presentan en la intersección, es necesario que la simulación presente una operación similar a la de campo. Por tanto, es necesario llevar a cabo una calibración y validación del modelo para poder realizar el análisis de conflictos.

Para las dos intersecciones, se simularon durante una hora y se llevaron a cabo tres simulaciones para cada intersección, con el fin de promediar los datos de las tres simulaciones. Cabe mencionar que en cada simulación únicamente se cambió la semilla aleatoria.

En la tabla 5.10 se muestran las simulaciones realizadas de los sitios 1 y 2, con los conteos de cada simulación y los conteos reales, así como la aplicación de contrastes estadísticos para determinar que la simulación de los dos sitios representa un modelo cercano a la realidad.

Tabla 5.10 Contrastes estadísticos de las simulaciones comparadas contra los datos reales de campo

Sitio	Datos simulados				Datos de campo	Contrastes estadísticos		
	Punto	Número de simulación	Conteo (veh)	Promedio (veh)	Conteo	Diferencia absoluta	GEH*	%RMSE**
1	Autopista	1	2,759	2,756	2,716	40	0.764	45.83
		2	2,793					
		3	2,716					
	Rama de incorporación	1	2,152	2,098	2,047	51	1.12	
		2	2,095					
		3	2,047					
2	Autopista	1	1,410	1,429	1,410	19	0.513	15.39
		2	1,423					
		3	1,455					
	Rama de incorporación	1	595	575	565	10	0.418	
		2	555					
		3	575					

Fuente: Elaboración propia.

*El estadístico GEH presenta una buena bondad de ajuste si $GEH < 5$ (Barcelo y Casas, 2004, Chu *et al.*, 2004, y Oketch y Carrick, 2005).

** El estadístico RMSE (*Root Mean Squared Error*) indica una bondad de ajuste buena con valores pequeños (Ciuffo y Punzo, 2010).

Tabla 5.11 Diferencias absolutas de las velocidades simuladas y las velocidades recopiladas en campo

Sitio	Datos simulados				Datos de campo	Contrastes estadísticos				
	Punto	Número de simulación	Velocidad (km/h)	Promedio (km/h)	Velocidad (km/h)	Diferencia absoluta	Diferencia absoluta %			
1 (km 208)	Autopista	1	84.32	85.47	72.56	12.91	15.11			
		2	86.49							
		3	85.61							
	Rama de incorporación	1	54.95	55.01						
		2	54.94							
		3	55.15							
2 (km 159)	Autopista	1	78.45	78.28	72.56	5.72	7.31			
		2	78.38							
		3	78.02							
	Rama de incorporación	1	44.7	45.38				50.67	5.29	11.67
		2	46.55							
		3	44.88							

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar que en el sitio 1 se tienen valores aceptables del estadístico GEH; sin embargo, tenemos un valor elevado del estadístico RMSE, ya que éste penaliza con gran rigor los errores. No obstante, se considerará como un buen ajuste debido a que el estadístico GEH presenta valores bastante bajos.

Otra variable que se comprobó para poder afirmar que existe una similitud entre el modelo de los sitios propuesto y su operación real es la velocidad, la cual se comparó mediante la velocidad simulada y la obtenida en campo. En la tabla 5.11 se muestran las velocidades y las diferencias absolutas obtenidas.

Como se puede apreciar no existen diferencias significativas entre las velocidades simuladas y las recabadas en campo, por lo que podemos concluir que ambos modelos de los sitios representan la operación de los puntos analizados.

5.4 Análisis de conflictos (situación actual)

Ya que el modelo de cada uno de los sitios presenta una operación similar a la real, se puede realizar el análisis de conflictos. Como se mencionó en apartados anteriores, se utilizó un programa desarrollado por la FHWA para determinar los conflictos presentados en los puntos en estudio, denominado SSAM.

Como parte de los datos que se requieren para poder realizar el análisis de conflictos dentro de la herramienta antes mencionada, es necesario contar con las trayectorias de los vehículos simulados en VISSIM. Estas trayectorias se recopilan durante la simulación y se presentan en un archivo de texto con la extensión *.trj. Este archivo contiene las aceleraciones, velocidades, posiciones y descripciones de cada tipo de vehículo por cada paso de simulación realizado.

Se comienza por importar dicho archivo en el programa SSAM, como se muestra en las figuras 5.15 y 5.16.

Además del archivo de trayectorias introducido, es posible editar los valores de los ángulos de los tipos de conflictos que se presentan en campo. Éste es un apartado que se utiliza cuando se ha realizado un análisis de los tipos de conflictos que se presentan en la realidad en el sitio analizado, detallando dicha información por tipo de vehículo; sin embargo, para fines del presente estudio no se cuenta con dicha información, cuya recopilación requiere de personal especializado capaz de reconocer el tipo de conflicto en campo y, con ayuda de software computacional, estimar los ángulos de dichos conflictos observados en campo (Fan *et al.*, 2013). Al no contar con el software especializado para la medición de los ángulos, se decidió utilizar los ángulos de que se dispone por default, preestablecidos por una serie de estudios realizados por la misma FHWA (Gettman *et al.*; 2008). Dichos ángulos de conflictos se muestran en la figura 5.17.

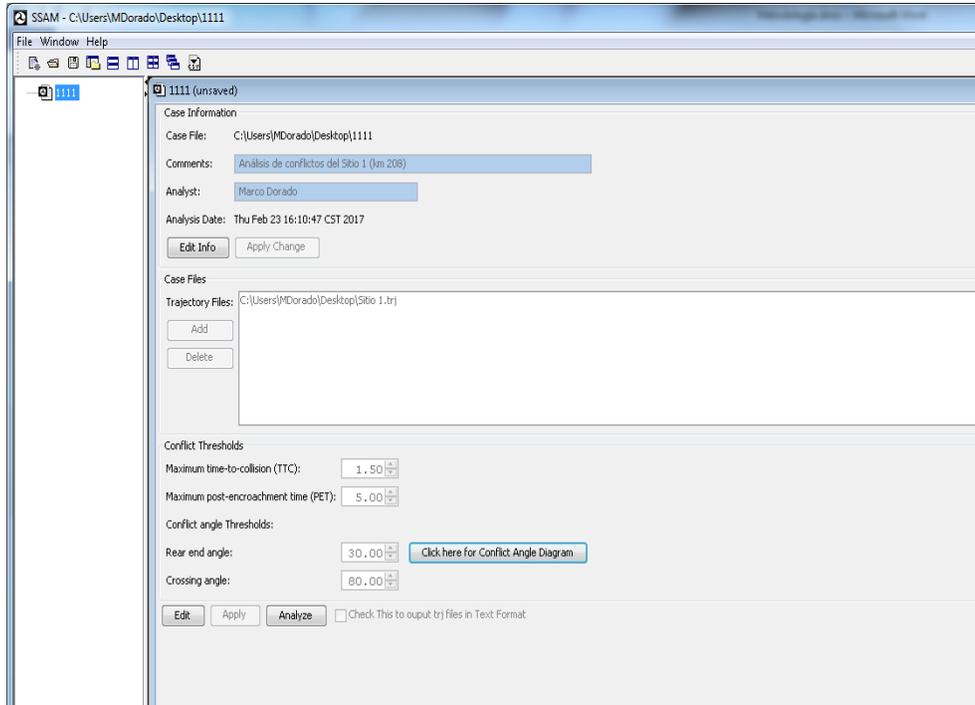


Figura 5.15 Introducción de datos de trayectorias del sitio 1

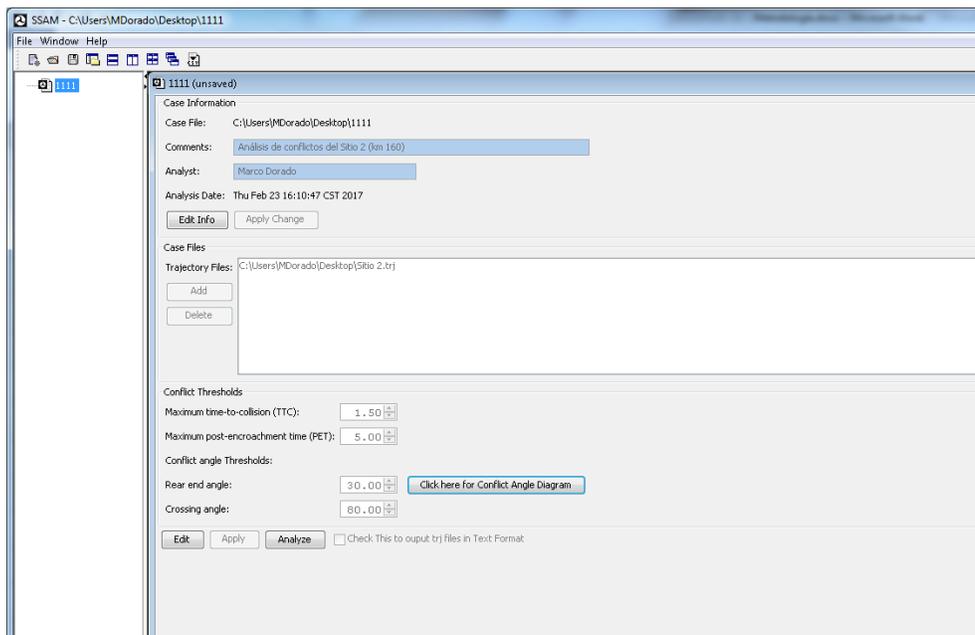


Figura 5.16 Introducción de datos de trayectorias del sitio 2

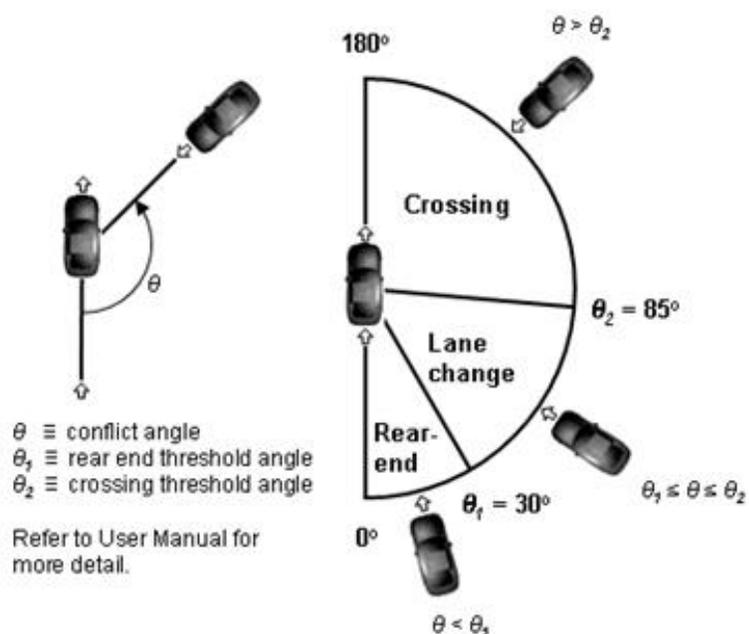


Figura 5.17 Ángulos de conflictos con base en el manual del software SSAM.

El análisis de los conflictos de los sitios 1 y 2 se muestra en las tablas 5.12 y 5.13, respectivamente.

En dichas tablas se presenta un resumen de los conflictos calculados. En la primera columna se muestra el nombre del archivo de trayectorias utilizado; en la segunda columna (tMinTTC) se muestra el tiempo de la simulación donde se observó el mínimo valor del tiempo para la colisión (TTC); la tercera columna (xMinPET) es la coordenada X que especifica la localización aproximada del conflicto en el tiempo de la simulación cuando se observó el valor de PET; la cuarta columna (yMinPET) es la coordenada Y que especifica la localización aproximada del conflicto en el tiempo de la simulación cuando se observó PET. La quinta y sexta columnas se refieren al tiempo para la colisión calculado (TTC) y el tiempo de invasión posterior (PET). Hydén (1987) explica de manera detallada el tipo de conflicto de tiempo para la colisión (TTC), y Songchitruksa y Tarko (2006) exponen de manera detallada el tipo de conflicto del tiempo de invasión posterior (PET).

Para el sitio 1, se observaron 27 conflictos de parte trasera (*rear end*) y 15 de cambio de carril (*lane change*). En el sitio 2 se observaron 42 conflictos de parte trasera y cinco de cambio de carril. Estos conflictos tienen valores tanto de tiempo para la colisión (TTC) como tiempo de invasión posterior (PET). En el análisis de las trayectorias del software se realizan los dos tipos de análisis de acuerdo con las posiciones del vehículo (Gettman *et al.*, 2008).

Tabla 5.12 Conflictos calculados del sitio 1

trjFile	tMinTTC	xMinPET	yMinPET	TTC	PET	Tipo de conflicto
Sitio 1.trj	133.8	1,617.70	322.28	0	0	rearend
Sitio 1.trj	136.8	1,609.73	320.55	0	0	rearend
Sitio 1.trj	143.6	1,621.86	323.66	0	0	lanechange
Sitio 1.trj	149.8	1,635.78	327.55	0	0	lanechange
Sitio 1.trj	197.2	1,648.38	330.59	0	0	rearend
Sitio 1.trj	202	1,646.94	330.32	0.4	0.2	rearend
Sitio 1.trj	303.4	1,624.13	324.23	0	0	lanechange
Sitio 1.trj	441.2	1,626.12	324.56	0	0	lanechange
Sitio 1.trj	442.8	1,638.51	328.05	0	0	rearend
Sitio 1.trj	503.4	1,665.97	327.25	0	0	rearend
Sitio 1.trj	525.2	1,629.66	325.59	0	0	lanechange
Sitio 1.trj	543.4	1,639.15	328.42	0	0	rearend
Sitio 1.trj	620.2	1,646.90	330.29	0	0	rearend
Sitio 1.trj	694	1,646.04	330.1	0	0	rearend
Sitio 1.trj	1,247.80	1,633.75	325.98	0	0	lanechange
Sitio 1.trj	1,269.20	1,654.85	332.61	0	0	rearend
Sitio 1.trj	1,364.40	1,644.50	329.82	0	0	rearend
Sitio 1.trj	1,411.40	1,649.07	330.94	0	0	rearend
Sitio 1.trj	1,665.60	1,657.39	333.26	0	0	rearend
Sitio 1.trj	1,703.00	1,635.54	326.8	1.5	0.8	rearend
Sitio 1.trj	1,747.80	1,501.69	299.47	1.5	0.8	rearend
Sitio 1.trj	1,772.40	1,621.77	323.04	0	0	rearend
Sitio 1.trj	1,954.20	1,561.95	311.64	1.2	0.4	lanechange
Sitio 1.trj	1,968.20	1,645.02	329.9	0	0	rearend
Sitio 1.trj	2,103.40	1,618.77	322.81	0	0	lanechange
Sitio 1.trj	2,246.00	1,600.24	318.51	0	0	lanechange
Sitio 1.trj	2,268.80	1,609.20	321.1	0	0	lanechange
Sitio 1.trj	2,323.60	1,620.26	323.3	0.9	0.2	lanechange
Sitio 1.trj	2,326.80	1,641.85	329.21	0	0	rearend
Sitio 1.trj	2,417.00	1,619.65	322.98	0.8	0.2	lanechange
Sitio 1.trj	2,485.20	1,625.46	324.4	1.5	0.6	rearend
Sitio 1.trj	2,745.40	1,644.98	329.91	0	0	rearend
Sitio 1.trj	2,761.60	1,643.03	329.3	0	0	rearend
Sitio 1.trj	2,759.60	1,630.81	325.61	1.2	0.4	rearend
Sitio 1.trj	2,801.40	1,440.83	288.42	0	0	rearend
Sitio 1.trj	2,830.40	1,642.95	329.48	0	0	rearend
Sitio 1.trj	2,934.60	1,482.24	294.96	0	0	lanechange
Sitio 1.trj	3,031.20	1,653.83	332.19	0	0	rearend
Sitio 1.trj	3,063.00	1,649.95	331.15	0	0	rearend
Sitio 1.trj	3,201.00	1,644.17	329.71	0	0	rearend
Sitio 1.trj	3,207.60	1,641.97	328.84	0	0	lanechange
Sitio 1.trj	3,336.80	1,627.02	324.55	0	0	lanechange

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.13 Conflictos calculados del sitio 2

trjFile	tMinTTC	xMinPET	yMinPET	TTC	PET	Tipo de conflicto
Sitio 2.trj	98.4	-11,130,674.00	2,302,223.75	0.1	0	rearend
Sitio 2.trj	108.6	-11,130,828.00	2,302,287.50	0.1	0.2	rearend
Sitio 2.trj	186	-11,130,750.00	2,302,258.50	0.1	0.2	lanechange
Sitio 2.trj	238	-11,130,806.00	2,302,280.50	1.5	1	lanechange
Sitio 2.trj	248.2	-11,130,789.00	2,302,274.50	0.1	0.8	rearend
Sitio 2.trj	280.6	-11,130,684.00	2,302,227.50	0.3	0.4	rearend
Sitio 2.trj	413.6	-11,130,738.00	2,302,253.50	0	0	rearend
Sitio 2.trj	470.6	-11,130,717.00	2,302,245.00	1.5	0.4	rearend
Sitio 2.trj	473.8	-11,130,712.00	2,302,245.50	0	0	lanechange
Sitio 2.trj	553	-11,130,805.00	2,302,273.75	0	0	rearend
Sitio 2.trj	551.4	-11,130,780.00	2,302,270.50	0.1	3.6	rearend
Sitio 2.trj	687	-11,130,802.00	2,302,276.00	0.1	0.2	rearend
Sitio 2.trj	874.6	-11,130,654.00	2,302,218.75	0.1	0.2	rearend
Sitio 2.trj	882.6	-11,130,776.00	2,302,268.75	1.4	2.6	rearend
Sitio 2.trj	960	-11,130,774.00	2,302,268.00	0	0	rearend
Sitio 2.trj	962.6	-11,130,812.00	2,302,281.00	0.4	0	rearend
Sitio 2.trj	1,034.20	-11,130,721.00	2,302,246.50	1.5	1.2	rearend
Sitio 2.trj	1,036.60	-11,130,737.00	2,302,253.00	0.6	0	rearend
Sitio 2.trj	1,095.60	-11,130,630.00	2,302,223.50	1.5	1.6	rearend
Sitio 2.trj	1,101.60	-11,130,628.00	2,302,223.50	1.2	1.2	rearend
Sitio 2.trj	1,102.80	-11,130,624.00	2,302,223.50	1.5	1.6	rearend
Sitio 2.trj	1,104.60	-11,130,636.00	2,302,224.00	1.5	1.6	rearend
Sitio 2.trj	1,109.60	-11,130,774.00	2,302,268.25	1.3	2.2	rearend
Sitio 2.trj	1,115.60	-11,130,806.00	2,302,282.00	0.1	0	rearend
Sitio 2.trj	1,164.00	-11,130,828.00	2,302,287.50	0.1	0	rearend
Sitio 2.trj	1,362.00	-11,130,812.00	2,302,285.00	0	0	rearend
Sitio 2.trj	1,434.00	-11,130,788.00	2,302,273.50	0.3	0	rearend
Sitio 2.trj	1,521.80	-11,130,796.00	2,302,277.50	0.1	0	rearend
Sitio 2.trj	1,641.60	-11,130,668.00	2,302,231.00	1.1	1	rearend
Sitio 2.trj	2,087.20	-11,130,739.00	2,302,254.00	1.5	0.4	rearend
Sitio 2.trj	2,113.60	-11,130,727.00	2,302,249.00	0.4	0	rearend
Sitio 2.trj	2,122.40	-11,130,822.00	2,302,289.00	0	0	lanechange
Sitio 2.trj	2,140.40	-11,130,660.00	2,302,213.75	0.6	0	rearend
Sitio 2.trj	2,315.20	-11,130,684.00	2,302,228.00	0.3	0	rearend
Sitio 2.trj	2,766.80	-11,130,761.00	2,302,255.50	0	0	rearend
Sitio 2.trj	2,901.20	-11,130,664.00	2,302,219.50	0.1	1	rearend
Sitio 2.trj	2,972.20	-11,130,710.00	2,302,243.00	0.7	0.4	lanechange
Sitio 2.trj	3,169.40	-11,130,724.00	2,302,249.75	0.1	0	rearend
Sitio 2.trj	3,172.80	-11,130,796.00	2,302,277.75	0.1	1.2	rearend
Sitio 2.trj	3,229.80	-11,130,644.00	2,302,214.25	0.1	0.8	rearend
Sitio 2.trj	3,405.40	-11,130,726.00	2,302,247.75	1.3	1	rearend
Sitio 2.trj	3,409.00	-11,130,743.00	2,302,253.00	0.1	0	rearend
Sitio 2.trj	3,415.00	-11,130,792.00	2,302,275.50	0.1	0	rearend
Sitio 2.trj	3,457.20	-11,130,666.00	2,302,216.50	0.3	0	rearend
Sitio 2.trj	3,453.40	-11,130,676.00	2,302,225.00	0.1	0	rearend
Sitio 2.trj	3,504.60	-11,130,793.00	2,302,276.00	0.4	0.2	rearend
Sitio 2.trj	3,586.60	-11,130,787.00	2,302,273.50	0.1	0	rearend

Fuente: Elaboración propia.

Complementario a los análisis de conflictos anteriores, a partir del estudio del video tomado en el sitio en estudio, se observó que la mayoría de las incorporaciones se realizaban en los primeros 50 m de la intersección, lo que supone una distancia muy escasa para los vehículos que circulan en la vía principal, ya sea para frenar o cambiar de carril y evitar una colisión con los vehículos que se incorporan de la rama de incorporación.

5.5 Simulación de los sitios en estudio con las medidas de mejoramiento propuestas

A partir de la problemática descrita en el capítulo 4 y en el apartado anterior, se proponen algunas medidas de mejoramiento de la infraestructura para cada sitio analizado, mismas que se incorporan al programa de simulación, con el objetivo de poder determinar si hay una reducción en el número de conflictos, una vez implementadas las medidas de mejoramiento propuestas. A continuación se describen de manera general las medidas de mejoramiento simuladas, y se presentan los resultados para cada uno de los sitios analizados.

Sitio 1 (km 208+000 al 208+500)

Para el sitio 1 se cambió la geometría de la rama de incorporación con base en el análisis realizado y se colocó un elemento de reducción de velocidad dentro del programa VISSIM para simular las condiciones reales de un reductor de velocidad colocado en el pavimento (rayas semilogarítmicas). De esta manera, se pretende reducir la velocidad en el punto de convergencia de la intersección, lo que ocasiona que los vehículos aceleren después de este punto por el carril de incorporación y realicen la maniobra de cambio de carril de una manera más ordenada, de forma que se reduzca el número de conflictos presentados en la intersección. En la figura 5.18 se muestran los cambios realizados a la intersección, los cuales incluyen la modificación de la longitud de la incorporación y la inclusión de rayas semilogarítmicas en la rama de incorporación. De igual forma, en la figura 5.19 se muestra dicho cambio realizado en el programa VISSIM.



Figura 5.18 Modificaciones a la intersección del sitio 1 (km 208+000)

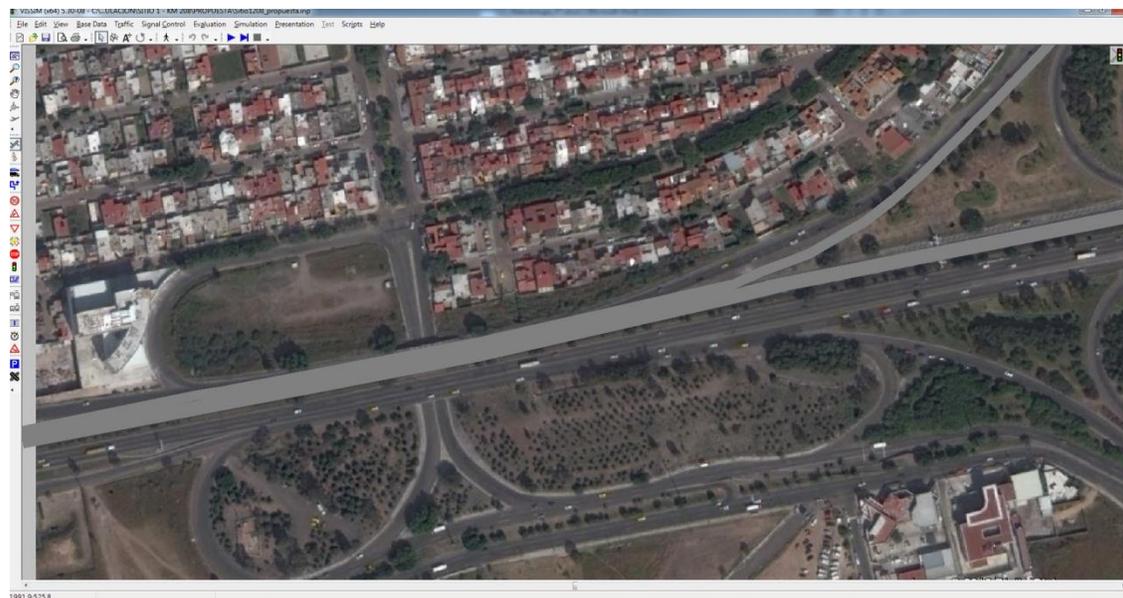


Figura 5.19 Intersección modificada en el programa VISSIM

Se simuló la intersección con los cambios realizados y con los mismos datos de operaciones anteriormente introducidos en el programa. En la tabla 5.14 se presentan algunos de los resultados de operación de la intersección simulada con las medidas de mejoramiento propuestas.

Tabla 5.14 Datos de operaciones simulados del sitio 1

Sitio	Datos simulados					
	Punto	Número de simulación	Conteo (veh)	Promedio (veh)	Velocidad (km/h)	Promedio (km/h)
1	Autopista	1	2808	2759	85.1	85.3
		2	2727		84.9	
		3	2742		85.8	
	Rama de incorporación	1	2079	2083	41.4	41.5
		2	2100		41.5	
		3	2069		41.6	

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, las propuestas de mejoramiento de la intersección se centraron en el cambio de velocidad de la rama de incorporación, así como en la longitud de entrecruzamiento para los vehículos que intenten cambiar de carril hacia los carriles centrales (en la tabla 5.14 se observa dicho cambio). Asimismo, se realizó una tabla comparativa con la simulación del escenario real de la intersección (la cual se muestra en la tabla 5.15), donde se aprecia que los flujos se mantuvieron de manera muy similar tanto en la rama principal como en la de incorporación; sin embargo, las velocidades cambiaron en la rama de incorporación, simulando el efecto de la reducción de velocidad de las rayas semilogarítmicas propuestas.

El siguiente paso para poder estimar un beneficio en los cambios de la configuración geométrica y operativa del sitio es realizar un análisis de los conflictos que se presentarían en caso de que se llevaran a cabo las adecuaciones recomendadas en el análisis de alternativas de mejoramiento de la intersección.

Los conflictos resultantes de la simulación realizada al escenario de mejoramiento del sitio 1 se muestran en la tabla 5.16.

Tabla 5.15 Comparativa de las simulaciones del sitio 1

Sitio	Punto	Simulación escenario real					Simulación escenario con medidas de mejoramiento			
		Número de simulación	Conteo (veh)	Promedio (veh)	Velocidades (km/h)	Promedio (km/h)	Conteo (veh)	Promedio (veh)	Velocidades (km/h)	Promedio (km/h)
1	Autopista	1	2759	2756	84.32	85.47	2808	2759	85.1	85.3
		2	2793		86.49		2727		84.9	
		3	2716		85.61		2742		85.8	
	Rama de incorporación	1	2152	2098	54.95	55.01	2079	2083	41.4	41.5
		2	2095		54.94		2100		41.5	
		3	2047		55.15		2069		41.6	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.16 Conflictos presentados en el escenario con medidas de mejoramiento del sitio 1

trjFile	tMinTTC	xMinPET	yMinPET	TTC	PET	MaxS	Tipo de conflicto
Sitio1208_propuesta.trj	90.6	1,783.15	363.6	0	0	15.63	rearend
Sitio1208_propuesta.trj	133.2	1,703.83	343.21	0	0	31.36	rearend
Sitio1208_propuesta.trj	196.6	1,681.89	335.04	0	0	17.81	lanechange
Sitio1208_propuesta.trj	478.2	1,756.39	355.51	0	0	26.98	lanechange
Sitio1208_propuesta.trj	1,381.40	1,793.73	368.35	0.1	1	12.4	rearend
Sitio1208_propuesta.trj	1,491.20	1,758.09	355.57	0	0	29.96	lanechange
Sitio1208_propuesta.trj	1,552.40	1,762.27	356.85	0	0	28.79	lanechange
Sitio1208_propuesta.trj	1,603.60	1,698.41	341.46	0	0	26.87	rearend
Sitio1208_propuesta.trj	1,678.00	1,693.23	340.03	0	0	28.38	rearend
Sitio1208_propuesta.trj	1,735.80	1,719.87	347.94	1.4	0.6	27.43	rearend
Sitio1208_propuesta.trj	1,882.00	1,702.99	342.77	0	0	26.18	rearend
Sitio1208_propuesta.trj	2,146.20	1,755.37	355.2	0.9	0.4	21.79	lanechange
Sitio1208_propuesta.trj	2,217.60	1,695.10	341.81	0	0	19.01	rearend
Sitio1208_propuesta.trj	2,292.80	1,797.54	370.44	0	0	11.17	rearend
Sitio1208_propuesta.trj	2,294.40	1,781.23	362.89	0	0	22.2	rearend
Sitio1208_propuesta.trj	2,302.00	1,771.83	359.83	0.6	0.2	18.16	lanechange
Sitio1208_propuesta.trj	2,397.80	1,715.78	346.78	1.3	0.4	26.9	rearend
Sitio1208_propuesta.trj	2,945.40	1,771.72	359.79	0.9	0.2	17.5	lanechange
Sitio1208_propuesta.trj	3,006.60	1,790.31	369.93	0	0	13.01	rearend
Sitio1208_propuesta.trj	3,089.40	1,759.93	356.18	0	0	27.15	lanechange
Sitio1208_propuesta.trj	3,162.00	1,777.38	361.56	0	0	16.14	rearend
Sitio1208_propuesta.trj	3,238.00	1,794.98	369.08	1.1	1.2	11.38	rearend
Sitio1208_propuesta.trj	3,563.60	1,792.84	367.87	0.1	1	11.77	rearend

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, se registraron 23 conflictos en este análisis para el sitio 1, 15 conflictos de parte trasera (*rear end*), y ocho de cambio de carril (*lane change*). Esto supone una mejora de 45.23% en comparación con los conflictos del sitio 1 bajo las condiciones actuales de operación, razón por la cual se concluye que las modificaciones a instrumentar recomendadas pueden reducir significativamente las probabilidades de accidentes.

Sitio 2 (km 159+000 a 160+000)

Para el sitio 2 se formularon recomendaciones en cuanto a la longitud de la rama de incorporación que consiste en un carril de aceleración, cuya longitud actual es de 140 m, misma que resulta insuficiente dadas las velocidades de operación del sitio. La longitud adecuada, calculada por el método AASHTO, es de 370 m para el carril de aceleración, así como 70 m adicionales para la transición.

En las figuras 5.20 y 5.21 se muestran los cambios geométricos realizados a la intersección del sitio 2.



Figura 5.20 Modificaciones geométricas de la intersección en el sitio 2



Figura 5.21 Intersección modificada en el programa VISSIM

Como se puede apreciar, la longitud de aceleración permitirá a los vehículos tener una mayor longitud para realizar la maniobra de incorporación, minimizando así las maniobras bruscas de incorporación que suelen presentarse en este tipo de intersecciones.

Asimismo, en la tabla 5.17 se presenta un concentrado de los datos simulados con la propuesta de mejoramiento, y en la tabla 5.18 se presenta el comparativo de las simulaciones de las condiciones actuales y las condiciones en caso de implementarse las medidas de mejoramiento.

Tabla 5.17 Datos de operaciones simulados del sitio 2

Sitio	Datos simulados					
	Punto	Número de simulación	Conteo (veh)	Promedio (veh)	Velocidad (km/h)	Promedio (km/h)
2	Autopista	1	1412	1404	80.39	80.29
		2	1370		80.20	
		3	1430		80.28	
	Rama de incorporación	1	570	546	44.30	43.43
		2	472		41.45	
		3	595		44.56	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.18 Comparativa de las simulaciones del sitio 2

Sitio	Punto	Simulación escenario real					Simulación escenario con medidas de mejoramiento				
		Número de simulación	Conteo (veh)	Promedio (veh)	Velocidades (km/h)	Promedio (km/h)	Conteo (veh)	Promedio (veh)	Velocidades (km/h)	Promedio (km/h)	
2	Autopista	1	1410	1429	78.45	78.28	1412	1404	80.39	80.29	
		2	1423		78.38		1370		80.2		
		3	1455		78.02		1430		80.28		
	Rama de incorporación	1	595	575	44.7	45.38	570	546	44.3	43.43	
		2	555		46.55		472		41.45		
		3	575		44.88		595		44.56		

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla 5.18, no hubo cambios significativos en los flujos o las velocidades del sitio 2, por lo que se procedió a realizar el análisis de conflictos correspondiente, el cual se muestra en la tabla 5.19.

Tabla 5.19 Análisis de conflictos para el sitio 2

trjFile	tMinTTC	xMinPET	yMinPET	TTC	PET	Tipo de conflicto
Sitio 2_propuesta.trj	171.2	-11,130,674.00	2,302,219.50	1.3	1	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	410.6	-11,130,828.00	2,302,219.50	0.1	0.4	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	423.2	-11,130,750.00	2,302,226.50	1.5	1.6	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	512.2	-11,130,806.00	2,302,217.25	0.1	0.6	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	582	-11,130,789.00	2,302,224.00	1.1	1.2	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	588.4	-11,130,684.00	2,302,224.00	1.4	1.2	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	1,238.20	-11,130,738.00	2,302,227.00	0	0	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	1,258.00	-11,130,717.00	2,302,212.50	0.1	0	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	1,310.00	-11,130,712.00	2,302,226.50	1.3	1.4	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	1,437.20	-11,130,805.00	2,302,218.50	0.2	0	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	1,490.60	-11,130,780.00	2,302,220.25	0.3	1	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	1,706.80	-11,130,802.00	2,302,226.50	1.5	1.6	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	1,819.60	-11,130,654.00	2,302,208.50	0	0	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	1,828.60	-11,130,776.00	2,302,222.25	0.2	0	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	2,024.60	-11,130,774.00	2,302,206.00	1.4	0.4	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	2,026.80	-11,130,812.00	2,302,225.00	1.5	0.4	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	2,103.00	-11,130,721.00	2,302,223.50	1.3	1.4	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	2,195.40	-11,130,737.00	2,302,237.50	0.1	0	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	2,201.20	-11,130,630.00	2,302,243.50	0.3	0	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	2,295.20	-11,130,628.00	2,302,219.00	0.1	0	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	2,288.60	-11,130,624.00	2,302,216.50	0.2	0	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	2,353.20	-11,130,636.00	2,302,219.75	0.1	0	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	2,372.20	-11,130,774.00	2,302,234.50	0.4	0	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	2,482.40	-11,130,806.00	2,302,234.00	0.7	0	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	2,689.40	-11,130,828.00	2,302,225.00	0	0	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	2,685.80	-11,130,812.00	2,302,225.50	1.3	0.6	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	2,982.80	-11,130,788.00	2,302,235.50	0.3	0	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	3,042.60	-11,130,796.00	2,302,226.50	1.5	1.6	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	3,045.80	-11,130,668.00	2,302,224.25	1.3	1.2	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	3,077.00	-11,130,739.00	2,302,229.00	0.1	0	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	3,351.40	-11,130,727.00	2,302,226.50	1.5	1.6	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	3,373.40	-11,130,822.00	2,302,227.50	0.2	0	rearend
Sitio 2_propuesta.trj	3,578.80	-11,130,660.00	2,302,213.00	0.3	0	rearend

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla 5.19, en comparación con el análisis de conflictos realizado para la situación actual del sitio 2, en este análisis se presentaron únicamente 33 conflictos de tipo posterior (*rear end*), por lo que eliminaron los conflictos de tipo de cambio de carril. Asimismo, la reducción de conflictos en comparación con el escenario actual es de 21.42%, por lo que se podría obtener dicho beneficio si se implantaran las medidas de mejoramiento propuestas.

6 Conclusiones

A raíz de los altos índices de accidentes y sus consecuencias a nivel mundial, los cuales se han convertido en una de las principales causas de muerte entre los jóvenes desde los 15 hasta los 29 años de edad, la Asamblea General de las Naciones Unidas lanzó en el año 2010 el Decenio de Acción por la Seguridad Vial 2011-2020, y en el año 2011 el Plan Global para el Decenio de Acción, planes a los que México se adhirió en 2011, conformando para tal fin la Estrategia Nacional de Seguridad Vial 2011-2020, que tiene como objetivo estabilizar y luego reducir en 50% las muertes proyectadas al año 2020, así como la disminución de los lesionados graves a causa de accidentes de tránsito, planteando llegar a esta meta mediante la implementación de acciones agrupadas dentro de cinco pilares: (I) gestión de la seguridad vial, (II) movilidad y vías más seguras, (III) vehículos más seguros, (IV) usuarios de las vías más seguros, y (V) respuesta después de la colisión.

En México, desde la puesta en marcha de la Estrategia Nacional de Seguridad Vial 2011-2020 se observa una tendencia decreciente en cuanto a accidentes y lesionados se refiere; sin embargo, la tendencia de la cantidad de fallecidos a causa de los accidentes de tránsito no fue la misma tendencia creciente en los primeros años, aunque a partir de 2013 comienza a estabilizarse e incluso se presentan algunas disminuciones.

Respecto al análisis de accidentalidad y sus saldos por ruta, se observa que, en los últimos cinco años para los que se dispone de información, son las rutas MEX-015 México-Nogales y la MEX-180 Matamoros-Puerto Juárez las que reportan el mayor NAE. Es interesante observar que las rutas que reportan los mayores NAE son aquellas que comunican la zona centro con la región norte del país, hecho que abre una posibilidad de estudio posterior, en el que se puedan averiguar las características operativas y de la infraestructura que combinadas incrementan el riesgo de ocurrencia de accidentes de tránsito.

Respecto a las carreteras más peligrosas, la México-Querétaro de cuota es la que cada año reporta el mayor NAE, motivo por el cual el presente estudio se centró en analizar uno de los tantos puntos conflictivos de la misma. Sin embargo, falta mucho por hacer, ya que es una de las carreteras más transitadas del país y presenta grandes diferencias de operación respecto a la hora del día. A partir de la presente investigación, se abre un abanico de futuras investigaciones en las que se podría estudiar, por ejemplo, la influencia de la variabilidad horaria de la distribución vehicular en la ocurrencia de accidentes, y la influencia de las zonas de obra en la accidentalidad y sus consecuencias, entre otras.

Al analizar la accidentalidad y sus consecuencia en los sitios estudiados, se observa que en la zona urbana de la ciudad de Querétaro (sitio 1) se reporta una mayor cantidad de percances que en el sitio 2 (en las inmediaciones a San Juan del Río); sin embargo, en el sitio 2 se reporta la mayor cantidad de víctimas, y es únicamente éste donde se reportan fallecidos.

Lamentablemente, la ocurrencia de accidentes en México es cada vez mayor que la esperada y, anteriormente las medidas de mitigación se basaban sólo en los registros de siniestros registrados por las autoridades correspondientes, proceso que lleva demasiado tiempo y genera medidas que resultan insuficientes, ya que dichos registros no contemplan alguna reconstrucción del percance producido. Por ello, en el presente estudio se incluye el uso de otras herramientas y métodos que complementan el análisis de accidentalidad, con lo que se busca atacar el problema desde diversos enfoques y así obtener una solución más efectiva en la reducción de la accidentalidad y sus consecuencias.

Mediante una combinación de métodos paliativos —como es el análisis de puntos negros— con otros métodos preventivos —como son las inspecciones de seguridad vial (ISV) y los análisis sustitutos de la accidentalidad—en el presente estudio se busca mejorar la seguridad vial de los sitios 1 y 2 mediante el mejoramiento de la infraestructura.

Entre los problemas más recurrentes encontrados durante la ISV en los sitios estudiados, se encuentra la longitud de la zona de entrecruzamiento, la presencia de objetos que representan un peligro en las zonas laterales, la falta o mala instalación y mantenimiento de las barreras de contención, así como el poco mantenimiento o inexistencia del señalamiento vertical y horizontal.

Dentro de los hallazgos de la ISV que más impactan la operación de los sitios 1 y 2, destaca el hecho de que las longitudes de los carriles auxiliares (entrecruzamiento para el sitio 1 y carril de aceleración para el sitio 2) no son suficientes y esto repercute directamente en los conflictos que se generan en los sitios.

Al evaluar la efectividad de las medidas de mejoramiento propuestas a partir de la ISV, mediante análisis sustituto de accidentalidad se observa que la implementación de las medidas mejorarán significativamente la operación de cada sitio, al reducir la cantidad de conflictos en cada uno, pasando de 42 conflictos en las condiciones actuales del sitio 1 a 23 conflictos si se implementaran las medidas de mejoramiento propuestas (mejora del 45.23%), mientras que para el sitio 2 se observa una reducción de los 47 conflictos actuales a 33 conflictos, una vez implementadas las medidas de mejoramiento (mejora del 21.42%).

A la luz de los resultados obtenidos, señalados con anterioridad, se concluye que la complementación de metodologías, tales como los análisis sustitutos de la accidentalidad son una alternativa al registro de accidentalidad, ya que basta con

simular los comportamientos presentados en las intersecciones estudiadas y determinar los conflictos (accidentes en potencia) que tienen lugar en las mismas.

Con el presente estudio se hace clara la importancia que reviste la complementación de metodologías en la reducción de la accidentalidad vial mediante la implementación de mejoras a la infraestructura y la evaluación de las mismas. Al aplicar análisis, como el mostrado en el presente estudio, se está en posibilidades de estimar los beneficios directos de la implementación de algunas medidas de mejoramiento, al poder inferir la reducción de los accidentes al presentarse menos conflictos en los sitios analizados.

Este estudio constituye un antecedente para obtener indicadores que permitan establecer una relación directa entre la reducción de conflictos con la reducción de accidentes, lo que abre una línea de investigación de la cual se pudieran obtener indicadores para los diferentes tipos de intersecciones.

Futuras investigaciones consecuentes al presente trabajo se han de centrar en el análisis de intersecciones con características geométricas y operativas similares, de forma que se puedan analizar las relaciones existentes entre la cantidad de conflictos reportados y la ocurrencia de accidentes, para caracterizar así los diversos tipos de intersecciones con algunos indicadores que contribuyan a prevenir la ocurrencia de accidentes y mitigar sus consecuencias.

Bibliografía

AASHTO (2011), *Roadside Design Guide 2002*, cuarta edición, American Association of State Highway and Transportation Officials [Asociación Estadounidense de Dependencias Estatales de Carreteras y Transportes].

Amundsen, F. y C. Hyden (1977), "The Swedish traffic conflict technique", relatorías y memorias del Primer Taller sobre Conflictos de Tránsito, Instituto de Economía del Transporte, Oslo, pp. 1-5.

Cal y Mayor R. y J. Cárdenas Grisales, (2007), *Ingeniería de tránsito: Fundamentos y aplicaciones*, octava edición, Editorial Alfa Omega, México, ISBN: 970-15-1238-3.

Cuevas Colunga, A. C., Mayoral Grajeda *et. al.* (2013-2016), *Anuario estadístico de accidentes en carreteras federales 2011, 2012, 2013, 2014 y 2015*, documentos técnicos núm. 56, 57, 61, 63 y 66, Instituto Mexicano del Transporte, México.

DGST, (2015), *Datos viales 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 y 2015*, Dirección General de Servicios Técnicos, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México.

DGST (2014), *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad*, sexta edición, Dirección General de Servicios Técnicos, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, D.F.

Essa, M. y T. Sayed (2015), "Simulated traffic conflicts: do they accurately represent field-measured conflicts?", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, núm. 2514, pp. 48-57.

Fan, R., H. Yu, P. Liu y W. Wang (2013), "Using VISSIM simulation model and Surrogate Safety Assessment Model for estimating field measured traffic conflicts at freeway merge areas", *IET Intelligent Transport Systems*, núm. 7(1), pp. 68-77.

Gettman, D. y L. Head (2003), "Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models", informe final Fhwa-Rd-03-050, 126; disponible en: www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/03050/index.cfm.

Gettman, D. y L. Head (2003), "Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models", *Transportation Research Record*, núm. 1840(1), pp. 104-115, <http://doi.org/10.3141/1840-12>.

Gettman, D., L. Pu, T. Sayed y S. G. Shelby (2008), *Surrogate safety assessment model and validation*, informe final, núm. FHWA-HRT-08-051.

Gettman, D., L. Pu, T. Sayed y S. Shelby (2008), *Surrogate Safety Assessment Model and Validation*, informe final, publicación FHWA-HRT-08-051. FHWA, U.S. Department of Transportation [Departamento de Transporte de Estados Unidos] 2008.

DGST (2016), *Manual de proyecto geométrico de carreteras (MPGC)*, Dirección General de Servicios Técnicos, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, D.F.

Migletz, D. et al. (1985), *Relationships between Traffic Conflicts and Accidents*, informe FHWA-RD-84-042, FHWA, U.S. Department of Transportation [Administración Federal de Carreteras del Departamento de Transporte de Estados Unidos].

OMS (2011), Plan Mundial para el Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020, Organización Mundial de la Salud.

Parker, M. R. y C. V. Zegeer (1989), *Traffic Conflict Techniques for Safety and Operations -- Observers Manual*, publicación FHWA-IP-88-027, FHWA, U.S. Department of Transportation [Administración Federal de Carreteras del Departamento de Transporte de Estados Unidos].

Perkins, S. R. (1969), *G M R traffic conflicts technique – procedure manual*, publicación de General Motors Research 895.

SCT (2009), Norma Oficial Mexicana NOM-036-SCT2-2009, Rampas de emergencia para frenado en carreteras, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, D.F.

SCT (2011), Norma Oficial Mexicana NOM-034-SCT2-2011, Señalamiento horizontal y vertical de carreteras y vialidades urbanas, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, D.F.

SCT (2012), Norma Oficial Mexicana NOM-037-SCT2-2012, Barreras de protección en carreteras y vialidades urbanas, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, D.F.

SCT (2013), Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCT2-2013, Amortiguadores de impacto en carreteras y vialidades urbanas, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, D.F.

SCT (2016), Norma Oficial Mexicana NOM-086-SCT2-2015, Señalamiento y dispositivos para protección en zonas de obras viales, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, D.F.

OMS (2015), *Global status report on road safety*, Organización Mundial de la Salud.



Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>