



Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil

Trabajo de Diploma

Aplicación del método de predicción de accidentes del "*Highway Safety Manual*" (HSM 2010) en el tramo Circunvalación – Universidad de la carretera rural Santa Clara entronque Vueltas en Villa Clara

Autor: Eva Dhilaadhila Alugodhi

Tutor: Dr. Ing. René A. García Depestre

Santa Clara, 2016

Año 58 de la Revolución

PENSAMIENTO

“[...] El camino es largo, el camino es difícil, el camino es duro; se requiere ir aprovechando los errores, se requiere la crítica, la autocrítica, el conocimiento honrado de cualquier error, para rectificar, para invertir mejor los recursos [...]”

Fidel Castro Ruz

DEDICATORIA

I dedicate this work to:

My mom, Susanna Arnold for her unconditional love, caring and support during all my way to where I am standing today.

To my aunt Theophilia Shaanika for always wanting the best for me and being my mentor and has been an inspiration towards my success.

To Hon. Bernardinus Shekutamba for being like a second father to me and always taking care of me.

To all my close friends and family for their support and courage they have given me during my worst and good moments of my journey.

AGRADECIMIENTO

I would like to thank God Almighty for his grace, love and blessings. For the health and strength that he has granted me my entire life. He is the king of kings. To my mom, aunts, uncle, sisters and brothers and the rest of the family for always keeping me in their prayers, for their motivation and all the help I have received leading to my wellbeing and success.

To my friends specifically Johanna, Victoria, Alberto, John Rambo, John Graft, Paulus, Molly, Marinice, Surizaday, Patricia, Arazay, Yanet, Meilyn and Pax, for being such wonderful souls to me through rough moments of life and always being ready to assist me in whatever way I needed.

To my tutor Professor Dr. Ing. René A. García Depestre, for being very kind, always sacrificing himself just to help me with this work and pushing me to do the best.

To all the teachers and professors that have shared their knowledge, skills and given me a way of becoming an excellent civil engineer.

To the rest of my classmates for being there when I needed their help.

To the Ministry of Regional and Local Government, Housing and Rural Development of the Republic of Namibia for giving me an opportunity to pursue my dream.

To the Cuban Government for making it possible for me to complete my study.

To everybody else who in whatever way contributed to my wellbeing and pushed me in a right direction.

Thank you!

RESUMEN

Una nueva herramienta empleada actualmente en el análisis de seguridad vial es el manual “*Highway Safety Manual*” (HSM) publicado en 2010 por la “*American Association of State Highway and Transportation Officials*” (AASHTO). Este manual es un recurso eficaz que dispone conocimientos y herramientas útiles que facilita mejorar las decisiones de carreteras basada en la consideración explícita de sus efectos sobre el potencial futuro de frecuencia de accidentes y la gravedad. En la presente investigación se aplicó el método predictivo del HSM 2010 en el tramo Circunvalación – Universidad, de la carretera rural de dos carriles de la provincia Villa Clara el cual presenta dificultades en la seguridad vial según el informe operativo del año 2015 de la Unidad Provincial de Tránsito, con el objetivo de predecir la frecuencia de accidentes esperados y su gravedad. Luego de realizar diferentes trabajos de campo para determinar las características geométricas y de control de los sitios en que fueron divididos el tramo se aplicó el procedimiento, los resultados obtenidos son: se dividió el tramo en 14 sitios, 7 segmentos y 7 intersecciones. La cantidad de accidentes total esperados en el tramo es de 17,5 accidentes/año; la cantidad de accidentes mortales y con lesiones esperados en el tramo es de 5,9 accidentes/año y la cantidad de accidentes con sólo daños materiales esperados en el tramo es de 11,6 accidentes/año. El número de la frecuencia de accidentes total esperados resultó menor comparado con la cantidad de accidentes observados en el año 2015 (31 accidentes/año).

Palabras claves: Seguridad vial, accidentes de tránsito, predicción de accidentes, frecuencia de accidentes.

ABSTRACT

One of the tools used currently to improve road safety is the Highway Safety Manual (HSM) published in 2010 by the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). The Highway Safety Manual (HSM) is a resource that provides safety knowledge and tools in a useful form to facilitate improved decision-making based on safety performance. The HSM assembles available information and methodologies on measuring, estimating and evaluating roadways in terms of crash frequency and crash severity. In this investigation the predictive method was applied to a road facility "*Circunvalación – Universidad*" that belongs to a rural two-lane two way road in Villa Clara province, to predict the expected average crash frequency and the crash severity using statistic data obtained from the provincial's accident report system year 2015 with the purpose of predicting the crash frequency and severity. The field work has been done in order to determine geometric characteristics and control features of sites in which the roadway was divided. The results of the method is: the roadway was divided into 14 sites, 7 segments and 7 intersections. The expected average crash of total accidents is 17,5 accidents/year; the expected average crash of fatal and injury (FI) accidents is 5,9 accidents/year and the expected average crash of property damage only (PDO) is 11,6 accidents/year. Comparing the results, the frequency of expected average crash of total accidents is less than the observed crash in the roadway facility (31 accidents/year).

Key words: Road safety, car crashes, accidents prediction, accidents frequency.

Tabla de Contenido

Introducción	1
Capítulo 1: Estado actual del conocimiento sobre la seguridad vial.....	7
1.1. Introducción.....	7
1.2. Seguridad Vial.....	7
1.2.1. Elementos componentes del sistema de seguridad vial.....	9
1.3. Accidentalidad Vehicular	12
1.4. Evaluación de la seguridad vial.....	14
1.4.1 Métodos para evaluar la seguridad vial	15
1.5. Conclusiones parciales	21
Capítulo II: Método predictivo del manual HSM 2010 en carreteras rurales de dos carriles	23
2.1. Introducción.....	23
2.2. Método predictivo de accidentes del HSM 2010	23
2.2.1. Modelo predictivo para segmentos de carreteras rurales de dos carriles.....	24
2.2.2. Modelo predictivo para intersecciones de carreteras rurales de dos carriles	24
2.3. Función de rendimiento de seguridad (SPFs).....	24
2.4. Factores de modificación de accidentes	27
2.4.1 Factores de modificación de accidentes para segmentos de carretera rural de dos carriles	28
2.4.2 Factores de modificación de accidentes para intersecciones de carretera rural de carriles.....	32
2.5. Factor de Calibración de Accidentes (Cr).....	34
2.6. Aplicación del método empírico Bayes (EB)	35
2.7. Procedimiento del método predictivo de accidentes del HSM 2010 para vías rurales de dos carriles.....	37
2.8. Limitaciones del método predictivo de accidentes del HSM 2010.....	42
2.9. Conclusiones parciales	43
Capítulo III: Aplicación del método predictivo del HSM 2010, en carretera rural Santa Clara entronque Vueltas y el análisis de resultados	44
3.1. Introducción.....	44
3.2. Etapa 1: Obtención de datos.....	44
3.3. Etapa 2: Aplicación del método predictivo en los distintos sitios de la carretera	45
3.3.1 Aplicación del método predictivo en los segmentos de la carretera:	45
3.3.2 Aplicación del método predictivo en las intersecciones de la carretera:	61

3.4. Etapa 3: Evaluación y análisis de los resultados	71
3.5. Conclusiones parciales	72
CONCLUSIONES	74
RECOMENDACIONES	75
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	76
BIBLIOGRAFÍA	78

Introducción

Los elementos fundamentales y determinantes en el desarrollo de un país son los sistemas de transporte, entre los cuales según (Cal et al., 2010) están: ferroviario, aéreo, acuático, transporte por ductos (tubos, cintas y cables) y carretero. Todos los sistemas de transporte deben cumplir consideraciones de tipo económico, características del terreno, medio ambientales y otros aspectos importantes, además de darle cumplimiento a regulaciones, normativas e instrucciones, que permiten obtener una obra de transporte resistente, duradera, agradable y segura.

En este trabajo se enfoca en el sistema de transporte carretero. El concepto de carretera según (Olmedo and Segismundo, 1986), consiste en una curva alabeada en el espacio de forma tal, que su vista en perspectiva ofrezca una armónica sucesión de imágenes de la vía, con el objetivo de garantizar un recorrido espacial continuo. También es definida por la Ley 109 Código de seguridad vial, como una vía de comunicación de uso público diseñada para el desplazamiento del tránsito.

La Ley 109 Código de seguridad vial, clasifican las carreteras atendiendo a su ubicación en urbana, cuando están dentro de zona urbana y rural, cuando se encuentran fuera de los perímetros urbanos. También se clasifican según su interés socioeconómico en carreteras nacionales, provinciales, municipales y de interés específico.

Uno de los problemas del sistema de transporte carretero es la seguridad, la que se manifiesta por la accidentalidad vehicular lo que como consecuencia traen aparejados la muerte, los traumatismos, los lesionados y daños materiales.

El informe sobre la situación actual de la seguridad publicado por la Organización Mundial de Salud plantea que anualmente a nivel mundial alrededor de 1,3 millones de personas mueren consecuencia de accidentes vehicular, de 20 a 50 millones personas resultan lesionadas, y este problema provoca pérdidas de propiedades estimado de 1,5% del Producto Interno Bruto (PIB), también estima una probabilidad de aumentar en un 65% hacia el 2030.

En una investigación realizada en el Reino Unido, un país de un gran desarrollo económico y social, las estadísticas señalan que más de la mitad de los niños que nacen resultan heridos en un accidente en algún momento de su vida y uno de cada 50, muere en un accidente de tránsito.

Según las estadísticas de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el 2013, la tasa de mortalidad por accidentes de tránsito en las diferentes regiones se comporta como se muestra en la figura 1.

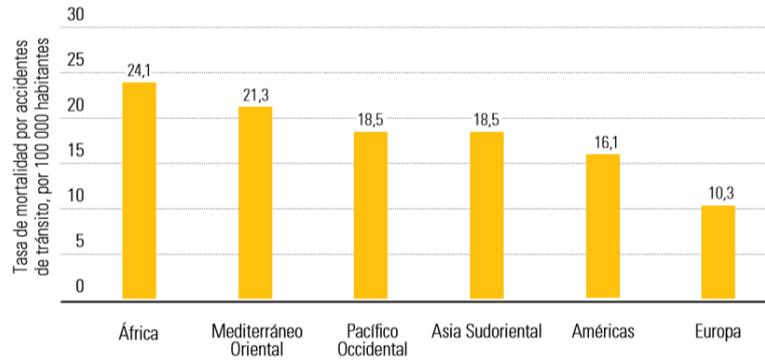


Figura 1: La tasa de mortalidad por accidentes de tránsito en las diferentes regiones del mundo.

Se observa que la tasa de mortalidad más elevada corresponde a la región de África con 24,1 muertes por 100 000 habitantes, seguida por las regiones de Mediterráneo Oriental, de Pacífico Occidental, Asia Sudoriental, Américas y por último el continente de Europa.

La OMS también señala que la mitad de las muertes mundiales por accidentes de tránsito corresponden a peatones (22%), ciclistas (5%) y motociclistas (23%), los llamados “usuarios vulnerables de la vía pública”. Los grupos que corren mayor riesgo varían de forma significativa en función de la región y de los ingresos de los países.

En la región de África, donde muchas personas se desplazan caminando o con bicicletas, los peatones representan una elevada proporción de las muertes (38%). En los países del Pacífico Occidental, donde los ciclomotores son un medio de transporte muy utilizados, el 36% de las muertes por accidentes de tránsito afectan a ocupantes de vehículos motorizados de dos y tres ruedas. La figura 2 muestra la distribución de muertes por accidentes de tránsito en función del tipo de usuario de la vía pública según la OMS.

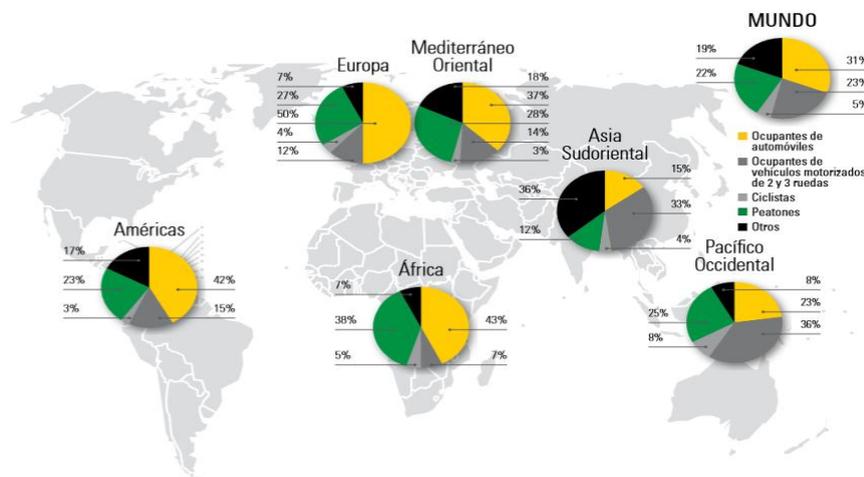


Figura 2: Muertes por accidentes de tránsito en función del tipo de usuario de la vía pública.

Cuba no está exenta de la problemática de la accidentalidad, según (Depestre et al., 2009), las provincias con mayores frecuencias de accidentes, número de fallecidos y lesionados son La Habana, Villa Clara, Ciego de Ávila, Sancti Spíritus y Santiago de Cuba. Las estadísticas anuales del Ministerio de Salud Pública reportan los accidentes de tráfico como la primera causa de muerte en las edades de uno a 34 años de edad, y provocan daños materiales superiores a 300 millones de pesos anuales.

En la provincia de Villa Clara el tramo Circunvalación – Universidad que pertenece a la carretera rural Santa Clara entronque Vueltas, es uno de los tramos peligrosos de la provincia. Según estadísticas obtenidas de los informes de la Comisión Nacional de Vialidad y Tránsito, en el 2014 ocurrieron 25 accidentes con 3 fallecidos y 24 personas lesionadas y en el 2015 se han registrado 31 accidentes con 1 fallecido y 47 personas lesionadas.

El impacto de accidentes de tránsito es de gran importancia por lo tanto es necesario prestar atención y emplear herramientas técnicas y científicas de análisis, estudio, y evaluación de seguridad vial para poder reducir la cantidad de accidentes; proponiendo y ejecutando diferentes medidas correctoras según las causas identificadas.

Problema Científico: ¿Cómo aplicar el *Highway Safety Manual* (Manual de Seguridad en Carretera) (por sus siglas en inglés HSM 2010) en el tramo de carretera rural Circunvalación – Universidad, perteneciente a la vía Santa Clara entronque Vueltas, en la provincia de Villa Clara para la predicción de accidentes y contribuir al proceso de la toma de decisiones de la seguridad vial?

Objeto de estudio: La seguridad vial en las carreteras rurales en la provincia de Villa Clara.

Objetivo general:

Aplicar el método predictivo del HSM 2010 a las condiciones cubanas en el tramo Circunvalación – Universidad de carretera rural Santa Clara entronque Vueltas en la provincia de Villa Clara, para la predicción de accidentes y contribuir al proceso de toma de decisiones.

Objetivos específicos:

- Profundizar en el estado de conocimiento actual de seguridad vial y predicción de accidentes de tránsito a partir de investigaciones realizadas acerca de la temática.

- Sistematizar el procedimiento metodológico para la aplicación del método predictivo de accidentes del HSM 2010 en carreteras rurales de dos carriles.
- Aplicar el método predictivo del HSM 2010 a las condiciones cubanas en el tramo Circunvalación – Universidad, carretera rural Santa Clara entronque Vueltas para estimar la frecuencia y la gravedad de accidentes esperados.

Hipótesis de la investigación: La aplicación de manual HSM 2010 a las condiciones cubanas permite predecir el potencial de la frecuencia de accidentes esperados y contribuir en la toma de decisiones a favor de la seguridad vial en carretera Santa Clara entronque Vueltas.

Tareas de investigación:

- Búsqueda, revisión bibliográfica preliminar y planteamiento del problema.
- Análisis y síntesis de la literatura científica relacionada al tema de investigación.
- Aplicación de procedimiento metodológico definido en el manual HSM 2010 en el tramo de carretera de estudio.
- Valoración de los resultados
- Elaboración del informe y defensa final.

Métodos

• **Métodos del nivel teórico:**

Inductivo – deductivo: Para la formulación de la hipótesis y evaluar las técnicas y herramientas en la valoración de la seguridad vial.

Histórico – lógico: Para conocer la valoración de la seguridad vial y la aplicación del manual HSM 2010 en Cuba a partir de la revisión de la literatura y documentación especializada.

Sistémico – estructural: Para analizar la utilización del manual como parte de un sistema que interactúa con la planificación, el diseño, operación y conservación de las carreteras rurales de interés nacional.

Análisis-síntesis: Para desarrollar el análisis del objeto de estudio y el campo de acción, a través de la descomposición en los elementos que lo integran y llegar a conclusiones.

- **Métodos del nivel empírico:**

Análisis de documentos, permite valorar lo establecido al respecto en seguridad vial en Cuba y otros países.

- **Métodos del nivel matemático y estadístico:**

Análisis de la accidentalidad a partir de índices y de la composición vehicular involucrada porcentualmente en el tramo seleccionado de carretera.

La novedad científica:

La novedad científica de la investigación consiste en emplear una herramienta que contribuye a la seguridad vial en carreteras rurales de Cuba, confeccionado para condiciones de otros países y la misma considera las características de carreteras y el tráfico.

Aporte fundamental:

Práctico: Aplicar el procedimiento metodológico establecido en el Manual de Seguridad en las Carreteras (HSM) a las condiciones de una carretera rural de dos carriles de Villa Clara para predecir la frecuencia de accidentes y la gravedad.

Resultados esperados: Una vez aplicado el procedimiento permitirá cuantificar y predecir la frecuencia de accidentes esperados y su gravedad. Además contribuirá a un proceso de toma de decisiones para la aplicación de tratamientos de seguridad, resultando posibles ahorros de costos a los organismos viales.

Estructura del trabajo de diploma:

- Resumen.
- Introducción.
- El capítulo I: El estado actual del conocimiento de la seguridad vial.
- El capítulo II: Método predictivo del HSM 2010 en carreteras rurales de dos carriles.
- El capítulo III: Aplicación del método predictivo del HSM 2010 en carretera rural Santa Clara entronque Vueltas, estudio y el análisis de los resultados.
- Conclusiones y recomendaciones.
- Referencias bibliográficas.

- Anexos.

Capítulo 1: Estado actual del conocimiento sobre la seguridad vial

1.1. Introducción

En el presente capítulo se pretende profundizar en el estado actual del conocimiento de la seguridad vial en base a diferentes literaturas consultadas. Se analiza los elementos componentes de seguridad vial, su contribución en ocurrencia de accidentes en forma independiente y en conjunto. Relacionado a la accidentalidad se define algunos conceptos básicos según distintas bibliografías y específicamente los del manual HSM 2010. Por último se aborda lo relativo a la evaluación de la seguridad vial con el propósito de reducir la cantidad de accidentes de tráfico y minimizar la severidad de los mismos.

1.2. Seguridad Vial

Desde 1952 la Organización Mundial de la Salud (OMS) celebra por medio de campañas temáticas de salud pública el Día Mundial de la salud. En el año 2004, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), a través de la OMS, en su compromiso por mitigar el impacto sanitario, social y económico provocado por la siniestralidad vial creó el grupo de colaboración de las Naciones Unidas para la seguridad vial, que desde entonces ha congregado organizaciones internacionales similares, gobiernos y entidades del sector privado, además de sus programas, fondos y organismos especializados, con el ánimo de implementar acciones locales, regionales y nacionales cuyo propósito apunta a la prevención de accidentes de tránsito (OMS, 2011 citado por (Barbosa, 2015)).

Desde entonces el término de la seguridad vial se ha convertido en unas de las temáticas de estudio. Varios investigadores han realizado estudios en la temática de la seguridad vial, contribuyendo al conocimiento de la ciencia y al desarrollo de tratamientos de la seguridad vial. Los autores (Sierra et al., 2010) destacan los siguientes cuatro referentes ineludibles de la Ingeniería de Seguridad Vial:

Kenneth A. Stonex: que durante 37 años ganó reconocimiento internacional por su contribución a la seguridad vial en el campo de pruebas de la *General Motors*. Él diseñó y desarrolló numerosos mejoramientos para reducir la probabilidad de muertes y lesiones de los usuarios de vía.

Jack E. Leisch: trabajó durante 54 años en varios sectores de la ingeniería de transporte y se distinguió por su conocimiento y aplicación a la ingeniería vial. Aumentó los conocimientos de la ciencia mediante las investigaciones; desarrolló y enseñó técnicas nuevas e innovadoras en planificación y diseño geométrico de caminos particularmente en su propuesta de ver el diseño del camino desde el punto de vista del conductor.

John C. Glennon: Doctor Ingeniero Civil y especialista en ingeniería de tránsito. Él es investigador de criterios de seguridad vial, regulaciones de velocidades, seguridad a los laterales de la calzada, análisis de “puntos negros”, justificaciones de los dispositivos de contención y autor de más de 100 informes técnicos reconocidos y premiados internacionalmente.

Ezra Hauer; Doctor Ingeniero y profesor emérito de la universidad de Toronto. Él ganó fama internacional por su rugosidad científica y por la comprensión práctica para relacionar el diseño geométrico y la seguridad vial. Su escrito sobre normas y seguridad es un clásico en la bibliografía vial mundial. Además es un innovador en los principios de la ingeniería vial y muchos de sus investigaciones guiaron la redacción del Modelo interactivo para el diseño en la seguridad vial (IHSDM) y el Manual de seguridad en carreteras (HSM).

Cuba no ha quedado atrás en el campo de esta temática. Se han realizados estudios de investigaciones con el propósito de reducir el problema del tránsito en Cuba. Las unidades involucradas en los estudios y acciones de minimizar la inseguridad vial incluyen el Centro Nacional de Vialidad (CNV), el Centro Nacional de Ingeniería del Tránsito (CNIT) y la Dirección Nacional de Tránsito (DNT), además existen múltiples trabajos desarrollados en centros de educación superiores como el Instituto Superior Politécnico “José A. Echeverría” (ISPJAE), la Universidad de Camagüey (UC) y la Universidad Central de Las Villas (UCLV). Entre los autores que han abordados mucho se destacan los trabajos de Martínez, 2000, 2005, 2006 y 2008; Albentosa et al., 2006; Alba, 2008; Rodríguez, 2008; Depestre y Martínez, 2012; Depestre et al., 2009; y Depestre et al., 2012.

La seguridad vial consiste en todas aquellas condiciones que permiten que las vías estén libres de daños o riesgos causados por la movilidad de los vehículos y está en base de normas y sistemas con las que se disminuyen las posibilidades de accidentes y sus consecuencias (Gutierrez and Ramos, 2014).

En Cuba el criterio de seguridad vial está definido en la Ley No 109, del Código de Seguridad Vial y plantea que: "la seguridad vial es un sistema integral que comprende el conjunto de actividades, funciones e instituciones jurídicas, íntimamente vinculadas entre sí, que tiene como finalidad el máximo aprovechamiento y duración de las inversiones, y el desplazamiento fluido, seguro y eficiente de vehículos y peatones en las vías" (Asamblea Nacional del Poder Popular, 2010).

Según (Alba, 2008 citado por (Claro, 2015)), los métodos que aplica la seguridad vial pueden ser proactivos y reactivos:

En el método proactivo, el análisis se realiza antes de ocurrir el accidente estudiando las características físicas y de operación de la vía para identificar las posibles deficiencias en la Seguridad Vial.

El método reactivo depende del análisis de los datos disponibles sobre los accidentes vehiculares de tránsito que ya han ocurridos, con el objetivo de detectar emplazamientos con situaciones anormales, para lo que es fundamental obtener la mayor información de los accidentes vehiculares.

Este trabajo está relacionado a la seguridad vial reactivo donde se utiliza los datos estadísticos disponibles de los accidentes ocurridos en el tramo de estudio para poder estimar la frecuencia de accidentes esperados.

La seguridad vial pretende garantizar el bienestar de los usuarios del sistema vial, conductor, peatón, ciclista y pasajeros, mediante mejoras en la infraestructura de la carretera y/o por medios campañas de concientización y educación vial, con el fin de introducir en la mente de las personas una cultura vial basada en la prevención de accidentes. Este es una función donde debe participar todos, además de los involucrados directos en un accidente como conductor, peatón, etc., deben participar también las autoridades públicas competentes, las instituciones educativas y de la salud, entre otros (Valdiviezo, 2014).

1.2.1. Elementos componentes del sistema de seguridad vial

Múltiples de autores, destacando (Valdiviezo, 2014); (Crespo, 2014); (Matamoros, 2015); (AASHTO, 2010); (Treat et al., 1979; Sabey y Staughton, 1979; PIARC, 2003; Dourthé y Salamanca, 2003; Ministerio de obras públicas de Chile, 2006, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2006; Mikulík et al., 2007; Álvarez, F. J. et al., 2010 citados por (Depestre, 2012)) muestran que en muchas y casi todas las ocasiones, los accidentes de tránsito no son productos de una sola causa, sino resultados de una compleja secuencia de acciones e interacciones entre los componentes del sistema de seguridad vial. Los estudios de causas de accidentes de tránsito indican que los accidentes ocurren principalmente por tres factores básicos que se inter-relacionan, denominados como la trilogía vial: factor humano, vehículo y vial-ambiental.

- **Factor humano** (Peatón, conductor y pasajero).

Es el factor más difícil de cambiar ya que las limitaciones y características humanas son una variable determinante en las investigaciones de seguridad vial, las cuales deben ser reconocidas y atendidas, desde la expectativa de la ingeniería de tránsito.

El conductor y el peatón son los que contribuyen más en ocurrencia de accidentes. El pasajero puede influir pero no tributa tanto.

▪ **Factor vehículo** (Características funcionales y mantenimiento del mismo)

Tratado como la unidad componente de la corriente vehicular, la cual está definida por sus parámetros macroscópicos: volumen, velocidad media y densidad, según (Cal et al., 1994; *Transportation Research Board* (TRB), 2000 y Radelat, 2003 citados por Depestre, 2012). Para su estudio los vehículos son clasificados por tipos, debido a la influencia particular de cada uno en las corrientes vehiculares y en las características geométricas del trazado de las carreteras.

A continuación se enuncian los componentes de la seguridad de vehículos antes, durante y después de accidentes de tránsito:

Seguridad activa. Se conforma de dispositivos que, además de su funcionamiento regular, responden de forma defensiva ante situaciones imprevistas. Las literaturas (CNAE, 2012; IRSST, 2010; Fundación Mapfre, 2015 citados por Barbosa, 2015) destacan los siguientes elementos vehiculares que participan en la seguridad activa.

- Sistemas de frenado: detienen el vehículo y, además, el sistema antibloqueo de frenos (ABS), evita el patinaje en la vía en caso de frenado de emergencia.
- Sistemas de control de estabilidad: equilibra el vehículo en caso de un cambio brusco de carril.
- Sistemas de dirección: sincroniza el giro de las ruedas según el comando del giro del volante.
- Sistemas de climatización: proporciona unos estados del clima dentro del vehículo según la programación de temperatura y humedad.
- Neumáticos: son el único elemento del vehículo en contacto con la vía, su buen estado determina la adherencia necesaria en el desplazamiento, el frenado y la amortiguación de los sobresaltos.
- Iluminación: contribuyen a la visibilidad del conductor y a que sea visto por otras agentes viales.
- Limpiaparabrisas: permite remover lluvia y objetos pequeños que obstaculicen la visibilidad del conductor.

Seguridad pasiva. Reúne elementos de respuesta protectora durante un evento vial inusual. Entre los principales que salvan vidas, y/o disminuyen impactos, según (CNAE, 2012; IRSST, 2010; Fundación Mapfre, 2015 citados por Barbosa, 2015) se destacan los siguientes elementos vehiculares que participan en la seguridad pasiva:

- Carrocería antivuelco: evita que la carrocería del vehículo se deforme ocasionado daño a sus ocupantes en caso de vuelco o impacto.
- Cinturón de seguridad: sistema de retención que evita que los ocupantes se golpeen o sean expulsados fuera del vehículo en caso de colisión.
- Bolsa de aire: sistema de protección que a través de bolsas de aire (exactamente gas nitrógeno) mitigan el impacto del cuerpo (cabeza, cuello y tórax) contra objetos duros en caso de colisión.
- Reposacabezas: evita lesiones de las vértebras cervicales (del cuello) por efecto látigo durante colisiones a velocidades superiores a 10km/h.

Seguridad terciaria: Comprende dos tipos de mecanismos, por una parte evita que los accidentes, una vez ocurridos, se agraven y por otra facilita la extracción o rescate de los ocupantes del vehículo. Entre los más comunes se encuentran según (Fundación Mapfre, 2013 citados por Barbosa, 2015) los siguientes:

- Apagado automático del motor: cierra la inyección de combustible al detectar un impacto.
- Desactivación de mecanismos de seguridad pasiva: desinflado de bolsa de aire. Apertura de las hebillas de sistemas de retención.
- eCall: llamada automática al servicio de emergencias.
- **Factor vial-ambiente** (Relacionado con la infraestructura vial y del Medio Ambiente).

Es la influencia del entorno y medio ambiente que incide en la accidentalidad como malas condiciones en la vía (fisuras, huecos, baches, pavimento etc.), falta de señalización (puentes peatonales, semáforos, cebras, puentes), congestión vehicular, aspectos de diseño geométrico tales como la sección transversal, el trazado en planta y perfil a mencionar algunos. Existen otros factores relacionados con el estado técnico que deben ser atendidos. Entre estas se encuentran agentes climatológicos como la lluvia, humedad, viento y temperatura; son aquellos elementos del medio que generan distracción, obstaculizan la marcha normal del vehículo y/o reducen la visibilidad del conductor.

- ❖ Cuando uno de estos factores, presenta alguna debilidad o falla, es cuando haya una probabilidad de ocurrir un accidente de tránsito (Valdiviezo, 2014).

La distribución de los factores que contribuyen a la ocurrencia de accidentes de tránsito según el HSM (AASHTO, 2010) se representa en la figura 1.1.

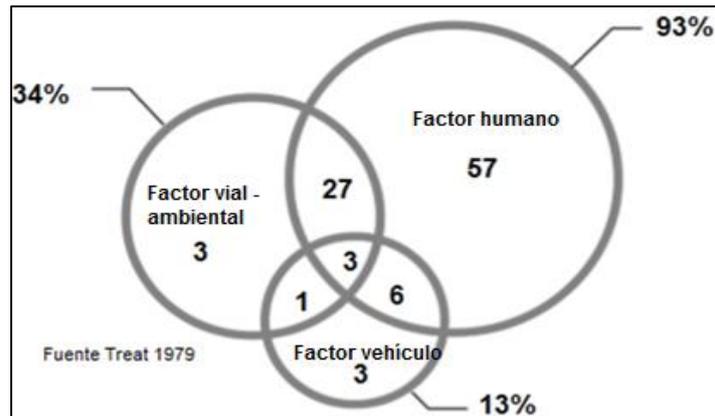


Figura 1.1 Incidencia de los factores simples y combinados en las causas de los accidentes de tránsito según el HSM. (Fuente: Treat, 1979)

Los resultados indican que el hombre tiene el mayor porcentaje de contribución en la accidentalidad (93%), él es la causa principal de accidentes de tránsito especialmente al conductor.

Es quien conduce el vehículo quien debe estar atento a lo que ocurre en la vía, los pequeños detalles y cambios en la 'armonía' de la misma y el que debe tomar las decisiones correspondientes en caso de un evento. Debe ser una persona emocional y psicológicamente estable, debe tener buena salud visual y general, no debe conducir bajo efectos de alcohol o alucinógenos y respetar todas las señales y normas de tránsito (Olaya, 2015).

En segundo lugar, se destaca la vía y el entorno (34%), donde están contemplados todos los elementos que intervienen en el siniestro, y en tercer lugar se ubica el vehículo (13%).

En Cuba se reconoce el predominio del factor humano como causa principal de ocurrencia de los accidentes y el registro de los datos enfocados habitualmente hacia la determinación de la responsabilidad más que hacia el análisis de las causas (Martínez, 2000; Albentosa et al., 2006; Alba, 2008 citados por Depestre, 2012). Además, se han establecido las proporciones para la provincia de Villa Clara a partir de las causas evidentes (Rodríguez, 2008 citado por Depestre, 2012), aunque todavía sigue siendo necesario profundizar en los análisis de las causas.

1.3. Accidentalidad Vehicular

Según el artículo 2 de la Ley 769 de 2002 – Código Nacional de Tránsito en Colombia, accidente de tránsito es un "Evento, generalmente involuntario, generado al menos por un vehículo en movimiento, que causa daños a personas y bienes involucrados en él e igualmente afecta la normal circulación de los vehículos que se movilizan por la vía o vías

comprendidas en el lugar o dentro de la zona de influencia del hecho” (Ley 769 de 2002, Código Nacional de Tránsito citado por (Olaya, 2015)).

El manual HSM, que se aplicará para responder el problema científico de este trabajo de investigación define un accidente como: Conjunto de sucesos imprevistos que como resultado causa lesiones o daños materiales debido a la colisión de al menos un vehículo motorizado, y que puede implicar colisión con otro vehículo motorizado, ciclista, peatón u objeto.

Otros aspectos fundamentales y de gran importancia acerca de la accidentalidad establecidos en el HSM:

Frecuencia de accidentes: número de accidentes que ocurren en un sitio particular, segmento de camino, o red vial durante un año.

Estimación de accidentes: cualquier método utilizado para pronosticar o predecir la frecuencia de accidentes.

Método predictivo: metodología para estimar la “frecuencia media de accidentes esperados” de un lugar, camino o segmento de camino bajo un diseño geométrico dado y volúmenes de tránsito para un lapso específico.

Frecuencia media de accidentes esperados: estimación de la frecuencia media de accidentes a largo plazo en un lugar, camino o red vial bajo un conjunto de características de diseño geométrico dado y volúmenes de tránsito durante un tiempo dado en años.

Lesión: daño físico a una persona.

Gravedad de accidente: lesión más grave causada por un accidente.

Niveles de gravedad de accidentes, según la escala KABCO utilizada por el HSM:

- K - Lesiones mortales: lesión que ocasiona la muerte.
- A - Lesión incapacitante: cualquier lesión, que no sea una lesión mortal, que le impida a la persona lesionada caminar, conducir, o continuar las actividades que era capaz de realizar antes del daño.
- B – Lesiones no incapacitantes evidentes: una lesión que no sea una lesión mortal o una lesión incapacitante: sí evidente para los observadores presentes en el lugar del accidente donde se produjo la lesión.
- C - Lesiones posibles: cualquier lesión informada que no sea mortal, incapacitante o no incapacitante evidente, e incluya reclamo de lesiones no evidentes.
- O - Sin Lesiones Personales: sólo daños a la propiedad (DOP).

El concepto de accidente, para el caso de Cuba, está definido por la Ley 60 del Código de vialidad y tránsito, y establece como accidente de tránsito: “el hecho que ocurre en la vía,

donde intervienen por lo menos un vehículo en movimiento y como resultado produce la muerte, lesiones de personas o daños materiales”.

Niveles de gravedad de accidentes para Cuba:

- FI: Accidentes mortales y con lesiones
- PDO: Daño materiales sólo
- FI+PDO: Accidentes total

1.4. Evaluación de la seguridad vial

A partir de la década del 80, la valoración del comportamiento de las carreteras con relación a la seguridad vial se ha convertido en una práctica internacional; se han identificado diferentes enfoques para la modelación estadística de la accidentalidad en la red de carreteras a partir del riesgo de la accidentalidad.

El progreso en materia de seguridad vial ha alcanzado un impulso necesario en los últimos años y a continuación se enumeran algunos de los principales logros alcanzados a nivel mundial según el informe de la situación de la seguridad vial en la región de las Américas, Organización Panamericana de la Salud : la publicación en el 2004 del informe mundial sobre prevención de los traumatismos causados por el tránsito; la serie de resoluciones sobre seguridad vial aprobadas por la Asamblea General de las Naciones Unidas, a partir de la resolución A/RES/58/289 (2004); la Semana Mundial sobre la Seguridad Vial de las Naciones Unidas, celebradas en el 2007 y el 2013; la primera Conferencia Ministerial Mundial sobre seguridad vial del 2009; los informes sobre la situación mundial de la seguridad vial publicados en el 2009 y el 2013, y la resolución A/RES/64/255 (2010) de la Asamblea General de las Naciones Unidas aprobada en marzo del 2010, por la que se estableció el Decenio de Acción para la seguridad vial 2011–2020. Apoyándose en estas resoluciones de la Asamblea General y en otros logros importantes, la Organización Panamericana de la Salud anunció en el 2011 el Plan de Acción de Seguridad Vial, en el que se establecieron directrices para sus estados miembros.

Para facilitar la toma de decisiones del ingeniero vial, los investigadores procuran proveer información cuantitativa y metodologías para medir, estimar y pronosticar el probable comportamiento de la seguridad vial en términos de frecuencia y gravedad de los accidentes. Por ello otro materia de suceso y de mayor uso en la valoración de la seguridad vial es el desarrollo de los métodos de evaluación de la seguridad vial que consisten modelos de predicción de accidentes (Eenink et al., 2005; AASHTO, 2010 y Bonneson et al., 2007 citados por Depestre, 2012).

Un modelo de predicción de accidente es una expresión matemática basada en la relación entre la accidentalidad y las variables que intervienen en el siniestro. El examen de los distintos modelos revela que las variables que se consideran pueden agruparse en tres:

- Las relacionadas con las características del flujo vehicular
- Las características asociadas a la carretera
- La combinación de ambas incorporando otras variables

1.4.1 Métodos para evaluar la seguridad vial

❖ Auditorías de seguridad vial (ASV)

Las Auditorías de Seguridad Vial surgieron en el Reino Unido a finales de la década de los ochentas como una medida para reducir la accidentalidad y su práctica se extendió a Australia, Nueva Zelanda, Canadá, y recientemente los Estados Unidos las han adoptado dentro de sus políticas viales. En la región de Latinoamérica, solo en Chile, Costa Rica y Colombia se comienzan a dar los primeros pasos hacia su establecimiento. Desde entonces su aplicación se puso en marcha en otros países como República Checa, Italia, Turquía, Austria, Bélgica, Alemania, Hungría, Holanda, Norway, Portugal y Suiza (Claro, 2015).

Cuba igual que todos los países, ha dado paso hacia el uso de las ASV. Está ampliando el conocimiento de su aplicación en eventos académicos y se trabaja sobre el mismo en el Ministerio de Transporte, creando conciencia de la necesidad de implementar este proceso en las diferentes etapas de los proyectos viales y, por supuesto, de su puesta en marcha con el objetivo de reducir los índices de accidentalidad y mortalidad, además de identificar los problemas principales de Seguridad Vial y obtener algunas ventajas que proporcionen mecanismos de control, tales como la reducción de los costos, tanto sociales como económicos (Collado, 2007 citado por Claro, 2015).

La definición aceptada a nivel internacional de la ASV es la de la Asociación de Transporte Vial y Autoridades de Tránsito de Australia y Nueva Zelanda (AUSTROADS, 2002 citado por Claro, 2015); que define la ASV como:

“Un examen formal de un proyecto vial, o de tránsito, existente o de futuro, o de cualquier proyecto que tenga influencia sobre una vía, en donde un equipo de profesionales calificado e independiente informa sobre el riesgo de ocurrencia de accidentes y del comportamiento del proyecto desde la perspectiva de la seguridad vial”.

Las ASV se dividen en las siguientes etapas:

1. Etapa de planificación

2. Etapa de diseño preliminar
3. Etapa de detalle preliminar
4. Etapa de construcción
5. Etapa de pre apertura
6. Etapa de post apertura
7. Etapa de explotación

Según estudios realizados por el Consejo Nacional de Tránsito de Chile y por la Universidad de Costa Rica citado por (Valdiviezo, 2014), una Auditoria de Seguridad Vial (ASV) es un procedimiento sistemático en el que un auditor independiente y calificado comprueba las condiciones de seguridad en un proyecto de carretera nueva, existente o cualquier otro proyecto que pueda estar afectando la vía o a los usuarios.

Mediante las ASV se pretende garantizar que las carreteras, desde su primera fase de planeamiento, se diseñen con los criterios óptimos de seguridad para los usuarios verificando luego que estos se cumplan en las siguientes fases de construcción, puesta a punto y en mantenimiento.

El objetivo de la ASV es asegurar que las vías operen en sus máximas condiciones de seguridad, para ello esta debe ser considerada desde la planificación, la construcción de la obra y en su mantenimiento, para minimizar la posibilidad de aparición de situaciones de riesgo que puedan implicar la ocurrencia de un accidente. Además que si se realizara en las primeras fases de un proyecto reduciría no sólo los costos socioeconómicos que implican las víctimas de los accidentes sino también los costos de la implementación de medidas de solución para reducir accidentes.

Entre los principales requisitos para la realización de ASV están:

- El equipo auditor debe ser pluridisciplinario, con presencia de expertos en seguridad vial, diseño de carreteras y accidentalidad.
- Es preferible, que el equipo esté formado por al menos 2 a 3 auditores.
- Imparcialidad del equipo auditor, que debe ser independiente del organismo gestor o propietario de la infraestructura e independiente del equipo encargado del diseño de la carretera.
- Compromiso de optimización de los recursos entre los auditores y los gestores, haciendo prevalecer los criterios de seguridad.
- Claridad en la asignación de responsabilidades, el responsable último de la infraestructura seguirá siendo la administración gestora.

- Gran capacidad de diálogo y acuerdo entre los auditores y los gestores, de forma que todas las decisiones se tomen teniendo en cuenta la seguridad de los usuarios de la carretera.
- La documentación sobre los elementos relacionados con la infraestructura, el entorno, los usos, tipos de tráfico y sus intensidades, usuarios, datos climáticos, incluyendo planos, croquis, fotografías, sin olvidar la normativa utilizada en el diseño.

La potencialidad de las ASV en carreteras nuevas como una de las principales herramientas preventivas para disminuir la accidentalidad no se pone en duda.

Las ASV en carreteras en servicio permitirían identificar problemas que podrían ser pasados por alto en tramos que no han sido catalogados como tramos de concentración de accidentes, aun así en las condiciones habituales de restricciones presupuestarias, puede resultar más rentable invertir en la identificación y mejora de los tramos de concentración de accidentes.

Una investigación en el Reino Unido indicó que hasta 1/3 de los accidentes se podrían evitar en una vía que se ha auditado, mientras otras investigaciones hablan de hasta un 50% de reducción. Además se reducen los costos en la vida útil de la vía, producto de una menor necesidad de modificar el diseño después de la construcción. Genera un mayor entendimiento y documentación de la ingeniería en Seguridad Vial, permitiendo el cruce de conocimientos entre los especialistas involucrados (Díaz, 2002 citado por Claro, 2015).

El autor (Martínez, 2006 citado por (Armenteros, 2010)) hizo una propuesta de elementos para la realización de las ASV en Cuba. Al aplicar la propuesta se pueden presentar dificultades debido a que no se dispone de toda la información necesaria; además, se recomienda que la ASV sea realizada por un organismo independiente y no por los propios organismos rectores de la actividad, condición que no siempre se cumple en Cuba.

De los modelos empleados a nivel internacional, las ASV constituye el método más utilizado para el análisis de la seguridad vial. Actualmente su aplicación literalmente es limitada en Cuba, al no disponer bases de datos necesarias, además de problemas objetivos. Sin embargo, es posible la valoración de los principales aspectos que influyen en la accidentalidad y contribuir a la seguridad vial en Cuba (Depestre, 2012).

❖ **Modelo interactivo para el diseño en la seguridad vial (IHSDM)**

El IHSDM es un programa informático desarrollado por la Administración Federal de Carreteras (FHWA), que permite evaluar varios aspectos de seguridad vial. El propósito práctico es dotar a los proyectistas viales y personas vinculadas al tema, de una herramienta de computación para considerar explícitamente las implicaciones sobre la seguridad de las decisiones de diseño

geométrico, durante las fases de planeamiento, diseño final y revisión de construcciones o reconstrucciones viales.

El IHSDM evalúa las opciones de diseño considerando sistemáticamente los alineamientos horizontal y vertical, las secciones transversales y los laterales del camino.

El programa está compuesto por seis módulos:

- Módulo de predicción de accidentes
- Módulo de consistencia del trazado
- Módulo conductor / vehículo
- Módulo de revisión y diagnóstico de intersecciones
- Módulo de revisión de normas
- Módulo de análisis de tráfico

El módulo de Predicción de Accidentes predice la frecuencia y gravedad de los accidentes viales, sobre la base del diseño geométrico y características del tránsito. Puede identificar posibles proyectos de mejoramiento de los caminos existentes, comparar el rendimiento de la seguridad relativa de opciones de diseño y evaluar la efectividad de costo de las decisiones de diseño relacionadas con la seguridad.

El módulo de consistencia del diseño trabaja con ecuaciones planteadas por un grupo de investigación norteamericano que evaluó diferentes combinaciones de alineamientos en planta y en perfil y los correlacionó con las velocidades medidas, estableciendo modelos matemáticos que permiten definir el perfil de velocidades de operación. Este módulo fundamenta su evaluación en el análisis del perfil de velocidades a lo largo del trazado y su comparación con la velocidad de proyecto (V_p). Así como, en la comparación de velocidades entre elementos consecutivos en planta. El perfil de velocidades se construye estimando el percentil 85 de la velocidad (V_{85}).

El módulo Revisión de Intersección evalúa la geometría de una intersección existente o diseño propuesto para identificar posibles problemas de seguridad y sugerir posibles tratamientos de mitigación.

El módulo Revisión de Norma tiene la función de revisar y analizar la seguridad nominal; controla si los elementos de diseño geométrico cumplen los criterios y normas de diseño. Puede proporcionar una evaluación inicial de cómo el diseño geométrico de un camino existente se compara con los actuales criterios de diseño. El módulo puede utilizarse en todo el proceso de diseño.

En Cuba se ha aplicado solamente íntegramente el módulo de consistencia del trazado para obtener el perfil de velocidades de operación de un tramo de carretera con dificultades con la seguridad vial aplicando la experiencia sobre análisis de consistencia del trazado en Cuba desarrollada por (Raoul, 2009), los resultados obtenidos no fueron satisfactorios pues las

ecuaciones *TWOPAS* que trae el modulo se determinaron para otras condiciones diferentes a las existentes en la carretera donde fueron aplicada, por lo que las velocidades obtenidas fueron muy superiores a las existentes en el tramo, posteriormente se recomendó obtener las ecuaciones para las condiciones de Cuba que reflejan la realidad de la velocidad de operación en carreteras nacionales.

❖ **Manual de seguridad vial (HSM)**

En el año 2010, la “*American Association of State Highway and Transportation Officials*” (AASHTO) lanzó la primera edición de un Manual de Seguridad Vial (HSM: “*Highway Safety Manual*”), el cual presenta herramientas de análisis basadas en una compilación de los mejores y más recientes estudios que establecen relaciones entre variables de infraestructura y la ocurrencia de accidentes.

Es una herramienta de trabajo que provee conocimiento sobre seguridad vial, en las etapas de planeamiento, proyección, construcción, operación y conservación.

El HSM reúne las mejores herramientas actuales de análisis, lo cual produce estimaciones más fiables del rendimiento de seguridad para los tomadores de decisiones; esto debería dar lugar a inversiones de seguridad con mayor efectividad de costo, cuyo resultado es más vidas salvadas y daños evitados por cada peso invertido, que es el objetivo fundamental de la ingeniería de la seguridad vial.

HMS es una recopilación de:

- Métodos para desarrollar un efectivo programa de administración de seguridad vial y la evaluación de sus beneficios
- Métodos de predicción para estimar la frecuencia y gravedad de accidentes, y apoyar la toma de decisiones de proyecto
- Catálogo de AMF para estimar el efecto de una variedad de tratamientos geométricos y operativos.

Con los conocimientos, herramientas, y metodologías del HSM se puede:

- Identificar los sitios con mayor potencial para la frecuencia de accidente o reducción gravedad.
- Identificar los factores que contribuyen a los accidentes y las contramedidas potenciales asociados para abordar estas cuestiones.
- Evaluar los beneficios de reducción de choque de los tratamientos aplicados.
- Realizar evaluaciones económicas de las mejoras para priorizar proyectos.
- Calcula el efecto de varias alternativas de diseño sobre la frecuencia de accidente y la gravedad.

- Estimar potencial de la frecuencia y la gravedad de choque en las redes de carreteras, y los posibles efectos de las decisiones de transporte en los accidentes.

El HSM se estructura en cuatro partes, A, B, C, y D, publicadas en tres tomos:

❖ Parte A: Introducción, Factores humanos, y Fundamentos

Describe el propósito y alcance del HSM; explica la relación del HSM en el proceso de desarrollo del proyecto: planificación, diseño, operaciones y actividades de mantenimiento.

Presenta un panorama de los principios de factores humanos para la seguridad vial, y los fundamentos de los procesos y herramientas descritas en el HSM.

Proporciona la información de referencia necesaria antes de aplicar métodos predictivos, factores de modificación de accidentes, o los métodos de evaluación previstos en el HSM. Es la base para el material de B, C y D.

❖ Parte B: Proceso de Administración de la Seguridad Vial

Pasos para controlar y reducir la frecuencia y gravedad de los accidentes en redes viales existentes. Incluye métodos útiles para identificar los sitios para mejoramiento, diagnóstico, selección de contramedidas, evaluación económica, priorización de proyectos y evaluación de la efectividad.

❖ Parte C: Métodos Predictivos

Se proporciona un método predictivo para estimar la frecuencia media de accidentes esperada de una red, instalación, o sitio individual. La estimación se puede hacer para las condiciones existentes, condiciones alternativas, o nuevas propuestas de caminos.

El método predictivo se aplica para un determinado lapso, volumen de tránsito, y características de diseño geométrico constantes del camino. Se aplica en el desarrollo y la evaluación de múltiples soluciones para un lugar específico; por ejemplo: un proyecto de camino que considera varias opciones de sección transversal podría utilizar la Parte C, para evaluar la frecuencia media de accidentes esperada de cada opción.

Se puede utilizar el método predictivo para la evaluación y comparación de la frecuencia media de accidentes esperados en situaciones como:

- Carreteras existentes utilizando los volúmenes de tráfico pasados o futuros.
- Diseños alternativos para una red vial existente utilizando los volúmenes de tráfico pasados o futuros.
- Diseños para una nueva red vial utilizando los volúmenes de tráfico futuros.
- La efectividad estimada de contramedidas después de un período de implementación.
- La efectividad estimada de contramedidas propuestas en una red vial existente.

❖ Parte D: Factores de Modificación de Accidentes (AMF)

Resume los efectos de los diversos tratamientos y las modificaciones geométricas y operativas en un sitio. Contiene todos los AMF para el HSM.

Factores de Modificación de Accidentes (AMF), representan el cambio relativo en la frecuencia de accidentes debido al cambio en una condición específica, cuando todas las otras condiciones y características del lugar permanecen constantes.

En el Volumen 2 – Parte C del HSM (AASHTO, 2010) se establecen varios modelos para predecir la frecuencia y distribución de accidentes en carreteras rurales de dos carriles, rurales multicarril y en arteriales urbanas y suburbanas; los mismos que han sido incluidos en el “Interactive Highway Safety Design Model” (IHSDM).

La estimación de accidentes según el HSM se basa en el promedio de accidentes previstos para las condiciones de base, afectado por los factores de modificación de accidentes (AMFs) y por un factor de calibración para condiciones locales y geográficas (Cr). Todas las estadísticas empleadas para desarrollar esos modelos provienen principalmente de los Estados Unidos, y en menor proporción de Noruega y Suiza (Anibal and Yasmany, 2012, Berardo, 2015), cuyas condiciones locales y geográficas son muy diferentes a las de Cuba.

Teniendo en cuenta lo anterior fuera de los Estados Unidos y Canadá, el HSM se debe aplicar con precaución. Las técnicas presentadas en el HSM deben calibrarse bien para que los resultados de una investigación resulten útiles.

Actualmente no se tiene el conocimiento de la aplicación del HSM en Cuba por lo tanto a través de este trabajo se dará los primeros pasos al uso de este nuevo método de seguridad vial. Aunque se aplicará el manual a las condiciones cubanas solamente para predecir la frecuencia de accidentes en la carretera de estudio, se espera emplear el HSM en Cuba para otras funciones que se logran mediante el uso del mismo.

1.5. Conclusiones parciales

- La seguridad vial es uno de los elementos que afecta la salud pública en el mundo entero por ello muchas organizaciones de diferentes estados han dedicados estudios para encontrar las causas principales de accidentalidad y como resultado se llegó a conclusión de que los accidentes de tránsito ocurren principalmente por tres factores básicos que se interrelacionan, denominados como la trilogía vial: factor humano, vehículo y vial-ambiental. Además se han destacado el factor humano como la causa principal.

- El progreso en materia de seguridad vial ha alcanzado un mayor impulso necesario en los últimos años y se han alcanzados numerosos logros a nivel mundial. Uno de los logros es el desarrollo de distintos métodos de mayor uso en la valoración de la seguridad vial: las Auditorías de seguridad vial (ASV), Modelo interactivo para el diseño en la seguridad vial (IHSDM) y el Manual de seguridad vial (HSM).
- De los modelos empleados a nivel internacional, las ASV constituye el método más abarcador para análisis de la seguridad vial, actualmente su aplicación literalmente es limitada en Cuba, al no disponer de bases de datos necesarias.
- La aplicación del IHSDM en Cuba no resultó satisfactoria pues el método es confeccionado para condiciones distintas de la carretera donde fue aplicado. Además, solo se ha utilizado el método, a través, del módulo de consistencia del trazado para obtener el perfil de velocidades de operación de un tramo de carretera con dificultades con la seguridad vial. Todavía no se pudo utilizar el método para evaluar el diseño en los demás cinco módulos que conforman el programa.
- El HSM igual que el IHSDM proviene de Estados Unidos con condiciones viales y de los conductores que difieren a las de Cuba, aunque no se tiene conocimiento en el uso del manual HSM actualmente es posible calibrar el modelo para la aplicación del mismo en la evaluación de seguridad vial en Cuba.

Capítulo II: Método predictivo del manual HSM 2010 en carreteras rurales de dos carriles

2.1. Introducción

En este capítulo se analiza los elementos fundamentales y de mayor aporte en el uso del método predictivo que se describe en la parte C del manual HSM 2010 a través de sus capítulos. El mismo se refiere a los elementos como: funciones de rendimiento de seguridad “*Safety Performance Functions*” (SPFs), factores de modificación de accidentes “*Accident Modification Factors*” (AMFs), factor de calibración “*Calibration factor*” (Cr) y el método Empírico Bayes “*Empirical Bayes (EB) method*”. También se presenta el procedimiento metodológico definido en el manual de seguridad en carreteras (HSM) a seguir en la aplicación del método predictivo en carretera rural de dos carriles existente para predecir la frecuencia de accidentes y la gravedad de los mismos.

2.2. Método predictivo de accidentes del HSM 2010

El método predictivo presentado en parte C del manual proporciona una metodología para estimar la frecuencia media de accidentes esperados de un sitio o red de las carreteras, para un período de tiempo dado, el diseño geométrico, las características de control del tráfico y volúmenes de tráfico (PAVDT).

Se estima la frecuencia media de accidentes esperados, $N_{esperado}$, usando una estimación de modelo predictivo de frecuencia de accidentes, $N_{estimado}$ (llamado la frecuencia media de accidentes) y la frecuencia de accidentes observados, $N_{observado}$ en caso que los datos están disponibles. Los elementos básicos del método predictivo son:

- La estimación de la frecuencia media de accidentes, mediante un modelo predictivo para un tipo del sitio específico. El modelo se ajusta para responder a las condiciones del sitio específico y las condiciones locales.
- El uso del método empírico Bayes (EB) para combinar la estimación del modelo estadístico con la frecuencia de accidentes observados de un sitio específico.

Para la aplicación del método predictivo la carretera se divide en sitios individuales que pueden ser segmentos homogéneos (tramo recto) o intersecciones, cada uno llamado un "sitio"; para lo cual presenta modelos predictivos separados, pero la fórmula genérica del modelo predictivo para ambos casos constan de tres elementos: función de rendimiento de

seguridad (SPF), factores de modificación de accidentes (AMF_{ix}) y factor de calibración (C_x).

2.2.1. Modelo predictivo para segmentos de carreteras rurales de dos carriles

El modelo predictivo para segmentos de carreteras responde a la ecuación 2.1.

$$N_{estimado_{rs}} = N_{spf_{rs}} \times C_r \times (AMF_{1r} \times AMF_{2r} \times AMF_{3r} \times \dots \times AMF_{12r}) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

$N_{estimado_{rs}}$: Predicción de frecuencia media de accidentes para un segmento individual de la carretera en un año específico (accidentes/año).

$N_{spf_{rs}}$: Predicción de frecuencia media de accidentes para condiciones “base” de un segmento individual de la carretera.

$AMF_{1r} \dots AMF_{12r}$: Factores de modificación de accidentes específicos para los segmentos de carretera bidireccional de dos carriles.

C_r : Factor de calibración de ajuste a condiciones locales para segmentos.

2.2.2. Modelo predictivo para intersecciones de carreteras rurales de dos carriles

El modelo predictivo para intersecciones de carreteras rurales responde a la ecuación 2.2.

$$N_{estimado_{int}} = N_{spf_{int}} \times C_i \times (AMF_{1i} \times AMF_{2i} \times AMF_{3i} \times AMF_{4i}) \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

$N_{estimado_{int}}$: Predicción de frecuencia media de accidentes para una intersección individual de la carretera en un año específico (accidentes/año).

$N_{spf_{int}}$: Predicción de frecuencia media de accidentes para condiciones “base” de una intersección individual de la carretera.

$AMF_{1i} \dots AMF_{4i}$: Factores de modificación de accidentes para intersecciones.

C_i : Factor de calibración de ajuste a condiciones locales para intersecciones.

2.3. Función de rendimiento de seguridad (SPFs)

Las funciones de rendimiento de seguridad son ecuaciones de regresión que estiman la frecuencia media de accidentes para un sitio dado (con ciertas condiciones base) en función del promedio anual de volumen diario de tránsito (PAVDT), y en el caso de los segmentos de

camino, también en función de la longitud de los mismos. Estas funciones estiman la frecuencia media de accidentes en general, pero el método permite separar por tipo de accidente y nivel de lesión.

Se le llama condiciones “base” a la situación y/o magnitud de las características geométricas y de control de tránsito de los sitios que fueron utilizados para realizar los modelos de regresión.

El HSM ofrece funciones de rendimiento de seguridad para tres tipos de carreteras rurales: de dos carriles, multicarril y arteriales. Para ellos, realiza la distinción entre segmentos (divididos o no divididos) e intersecciones (semaforizadas y sin semáforos). Para vías rurales se ofrecen SPFs para segmentos e intersecciones que se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Tipos de segmentos de carretera rurales e intersecciones según HSM 2010.

Tipo de sitio	Tipo de sitio con SPFs en el capítulo 10
Segmentos de la carretera	Segmentos no divididos de carretera rural de dos carriles (2U)
Intersecciones	Tres ramas controladas (3ST)
	Cuatro ramas controladas (4ST)
	Cuatro ramas semaforizadas (4SG)

Las ecuaciones para calcular las funciones de rendimiento de seguridad (SPFs) para distintos sitios de carretera se expresan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Sitios de la carretera con sus ecuaciones correspondientes para hallar SPFs.

SPFs para carreteras rurales de dos carriles	Ecuaciones para hallar SPFs
Segmentos (2U)	Ecuación 2.3
Intersecciones de tres ramas controladas (3ST)	Ecuación 2.4
Intersecciones de cuatro ramas controladas (4ST)	Ecuación 2.5
Intersecciones de cuatro ramas semaforizadas (4SG)	Ecuación 2.6

Cada SPF también tiene un parámetro de dispersión representado por la letra, k. Este parámetro proporciona una indicación de la fiabilidad estadística del SPF. Cuando el parámetro se acerca más a cero, se considera estadísticamente fiable el SPF. También es usado en el Método EB.

Ecuación 2.3: Segmentos de carretera rural de dos carriles

$$N_{spf_{rs}} = PAVDT \times L \times 365 \times 10^{-6} \times e^{-0,312} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

$N_{spf\ rs}$: Predicción de frecuencia total de accidentes para segmentos rurales bidireccionales de dos carriles para condiciones “base”.

PAVDT: Promedio anual de volumen diario de tránsito (veh/día).

L: longitud del segmento de camino (millas).

$$k = \frac{0,236}{L} \quad k = \text{parámetro de dispersión.}$$

L = longitud del segmento de camino (millas).

Este SPF es aplicables para un rango de PAVDT desde 0 hasta 17 800 veh/día.

Ecuación 2.4: Intersecciones de tres ramas controladas

$$N_{spf\ 3ST} = \exp[-9,86 + 0,79 \times \ln(PAVDT_{m\acute{a}x}) + 0,49 \times \ln(PAVDT_{m\grave{m}n})] \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

$N_{spf\ 3ST}$: Predicción de frecuencia total de accidentes para intersecciones de 3 ramas en condiciones “base”.

$PAVDT_{m\acute{a}x}$: Promedio anual de volumen diario de tránsito (veh/día) de la carretera principal.

$PAVDT_{m\grave{m}n}$: Promedio anual de volumen diario de tránsito (veh/día) de la carretera secundaria.

El parámetro de dispersión (k) para este SPF es 0,54. Este SPF es aplicable a un rango de $PAVDT_{m\acute{a}x}$ desde 0 a 19 500 vehículos/día y $PAVDT_{m\grave{m}n}$ desde 0 a 4 300 vehículos/día. Fuera de este rango la aplicación proporciona resultados menos confiables.

Ecuación 2.5: Intersecciones de cuatro ramas controladas

$$N_{spf\ 4ST} = \exp[-8,56 + 0,60 \times \ln(PAVDT_{m\acute{a}x}) + 0,20 \times \ln(PAVDT_{m\grave{m}n})] \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Donde:

$N_{spf\ 4ST}$: Predicción de frecuencia total de accidentes para intersecciones de 4 ramas en condiciones “base”.

$PAVDT_{m\acute{a}x}$: Promedio anual de volumen diario de tránsito (veh/día) en la carretera principal.

$PAVDT_{m\grave{m}n}$: Promedio anual de volumen diario de tránsito (veh/día) en la carretera secundaria.

El parámetro de dispersión (k) para este SPF es 0,24. Este SPF es aplicable a un rango de $PAVDT_{m\acute{a}x}$ desde 0 a 14 700 vehículos/día y $PAVDT_{m\grave{m}n}$ desde 0 a 3 500 vehículos/día. Fuera de este rango la aplicación proporciona resultados menos confiables.

Ecuación 2.6: Intersecciones de cuatro ramas semaforizadas

$$N_{spf\ 4SG} = \exp[-5,13 + 0,60 \times \ln(PAVDT_{m\acute{a}x}) + 0,20 \times \ln(PAVDT_{m\grave{m}n})] \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Donde:

$N_{spf\ 4SG}$: Predicción de frecuencia total de accidentes para intersecciones de 4 ramas en condiciones “base”.

$PAVDT_{máx}$: Promedio anual de volumen diario de tránsito (veh/día) en la carretera principal.

$PAVDT_{mín}$: Promedio anual de volumen diario de tránsito (veh/día) en la carretera secundaria.

El parámetro de dispersión (k) para este SPF es 0,11. Este SPF es aplicable a un rango de $PAVDT_{máx}$ desde 0 a 25 200 vehículos/día y $PAVDT_{mín}$ desde 0 a 12 500 vehículos/día.

2.4. Factores de modificación de accidentes

Los factores de modificación de accidentes (AMF) se utilizan para ajustar la estimación de la frecuencia de accidentes, dado por SPF “*Safety Performance de Seguridad*” (ecuaciones. 2.3; 2.4; 2.5 y 2.6), a las características individuales del sitio en estudio.

Específicamente, los AMF representan el cambio relativo en la frecuencia de accidentes debido a la variación de una condición dada, quedando constantes todas las otras condiciones y características del sitio.

Los AMF para las condiciones base de cada función de rendimiento de seguridad tienen un valor de 1. Cuando una o más condiciones del sitio en estudio difieren de las de base, los AMF pueden tomar valores mayores o menores a 1, dependiendo si esa característica particular está asociada a una mayor o menor frecuencia de accidentes.

Tabla 2.3: Condiciones base para segmentos de carretera rural de dos carriles.

Ancho de carril	3,65 m
Ancho de paseo	1,80 m
Tipo de paseo	Pavimentado
Curvatura horizontal	No
Variación de peralte	<0,01
Pendiente longitudinal	<3%
Densidad de acceso	5/mi
Banda central sonora	No
Carriles de adelantamiento	No
Carriles de giro izquierda bidireccionales	No
Tasa de peligrosidad de los bordes de la carretera	3
Iluminación	No
Regulación de velocidad automatizada	No

Fuente: Highway Safety Manual 2010. 1st Ed. Vol 2. Cap 10

Tabla 2.4: Condiciones base para las intersecciones de carreteras rurales de dos carriles.

Ángulo absoluto de intersección	0
Intersección con carriles de giro izquierda	No
Intersección con carriles de giro derecha	No
Iluminación	No

2.4.1 Factores de modificación de accidentes para segmentos de carretera rural de dos carriles

En el caso de los segmentos de carreteras de dos carriles cuando una o más condiciones de sitio difieren de las condiciones base, los AMF son los que se detallan a continuación:

- Ancho de carril

Debe ajustarse la función de rendimiento de seguridad (SPF) obteniendo el valor del AMF en función del PAVDT como se muestra en la tabla 2.5.

Los tipos de accidentes más probables de estar influenciados por el ancho de carril son: accidente de un sólo vehículo por salida de calzada, frontal, lateral en el mismo sentido o en sentido contrario. Por ello, como el modelo de predicción brinda valores de choques totales (incluidos todos los tipos) este AMF_{1r} se ve afectado por la proporción p_{ra} de los tipos de choques relacionados al ancho de carril (valor por defecto igual a 57,4%) en ecuación 2.7.

$$AMF_{1r} = (AMF_{ra} - 1) \times p_{ra} + 1 \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Este valor de 57.4% está basado en una distribución de tipos de choque que presenta el HSM pero pueden utilizarse datos locales si se cuenta con ellos.

Tabla 2.5: Factor AMF_{ra} en función del PAVDT

Ancho de carril	AMF_{ra}		
	PAVDT<400	400<PAVDT<2000	PAVDT>2000
≤9 pies	1,05	$1,05 + 2,81 \times 10^{-4} (PAVDT - 400)$	1,5
10 pies	1,02	$1,02 + 1,75 \times 10^{-4} (PAVDT - 400)$	1,3
11 pies	1,01	$1,01 + 2,5 \times 10^{-5} (PAVDT - 400)$	1,05
≥12 pies	1	1	1

Fuente: Highway Safety Manual 2010. 1st Ed. Vol 2. Cap 10

- Ancho y tipo de paseo

El AMF_{2r} se calcula en función de valores obtenidos de tabla mediante la ecuación 2.8.

$$AMF_{2r} = (AMF_{wra} \times AMF_{tra} - 1) \times p_{ra} + 1 \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Al igual que en el caso del ancho de carril, el valor del p_{ra} es, por defecto, 57,4% corresponde a la proporción del total de accidentes que más probablemente estén relacionados con estas características del segmento (ancho de carril y tipo y ancho de paseo).

El AMF_{wra} corresponde al ancho de paseo y tiene en cuenta los tipos de accidentes que pueden estar relacionados al mismo (accidente de vehículo sólo por salida de calzada, frontal

y laterales en el mismo sentido o en sentido contrario). Su valor se obtiene de la tabla 2.6 que está en función del PAVDT y del ancho real del paseo en estudio.

El AMF_{tra} corresponde al factor que corrige por el tipo de paseo. Su valor se obtiene de la tabla 2.7 y está dado en función del tipo de paseo del segmento en estudio (grava, césped, pavimento, o bien formada por más de un material) y el ancho de la misma.

Tabla 2.6: Factor AMF_{wra}

Ancho de paseo	AMF_{wra}		
	PAVDT<400	400<PAVDT<2000	PAVDT>2000
0 pies	1,1	$1,10 + 2,5 \times 10^{-4} (PAVDT - 400)$	1,5
2 pies	1,07	$1,07 + 1,43 \times 10^{-4} (PAVDT - 400)$	1,3
4 pies	1,02	$1,02 + 8,125 \times 10^{-5} (PAVDT - 400)$	1,15
6 pies	1	1,00	1
≥8 pies	0,98	$0,98 + 6,875 \times 10^{-5} (PAVDT - 400)$	0,87

Fuente: Highway Safety Manual 2010. 1st Ed. Vol 2. Cap 10

Tabla 2.7: Factor AMF_{tra}

Tipo de paseo	AMF_{tra}							
	Ancho de paseo (pie)							
	0	1	2	3	4	6	8	
Pavimentado	1	1	1	1	1	1	1	
Grava	1	1	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	
Formado por más de un material	1	1,01	1,02	1,02	1,03	1,04	1,06	
Césped	1	1,01	1,03	1,04	1,05	1,08	1,11	

Fuente: Highway Safety Manual 2010. 1st Ed. Vol 2. Cap 10

Si el ancho o el tipo de paseo de las dos direcciones de circulación del segmento difieren, el AMF_{2r} se obtiene por separado para cada dirección y luego se halla el promedio.

▪ Curvatura horizontal

Cuando el segmento en estudio presenta curvatura horizontal, se debe corregir la función de predicción con AMF_{3r} , ya que la condición de base es que el segmento sea recto. Para ello, se debe disponer de datos: la longitud de la curva, el radio y si tiene o no espirales. El cálculo del AMF_{3r} se realiza mediante la ecuación 2.9.

$$AMF_{3r} = \frac{1,55 \times L_c + \left(\frac{80,2}{R} \right) - 0,012 \times S}{1,55L_c} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Donde:

L_c : La longitud de la curva en millas e incluye las espirales si las tuviera.

R: El radio de curvatura en pies.

S toma el valor de 1 si la curva tiene espirales; 0,5 si tiene espirales sólo en uno de los extremos y 0 si no tiene ninguna.

Al aplicar esta ecuación, el valor mínimo que pueden tomar L_c y R es 100 pies, por lo cual, si el segmento en cuestión tiene curvas con valores menores, se utiliza el mínimo.

Si en el segmento elegido hay una serie de curvas se calcula un AMF para cada una, pero en la fórmula, L es la suma de las longitudes de las curvas y el R es el radio de cada curva individual.

- Si el valor de AMF_{3r} es menor que 1, se utiliza $AMF_{3r} = 1,00$.

▪ Peralte

El AMF para el peralte está dado por la diferencia entre el peralte de diseño recomendado en el Libro Verde de AASHTO y el peralte real de la curva. Si el peralte real coincide o es mayor al recomendado por el Libro Verde entonces el AMF es 1. Si no es el caso, el AMF se calcula mediante las ecuaciones 2.10:

$$AMF_{4r} = 1,00 \text{ si } SV < 0,01$$

$$AMF_{4r} = 1,00 + 6(SV - 0,01) \text{ si } 0,01 \leq SV < 0,02$$

$$AMF_{4r} = 1,06 + 3(SV - 0,02) \text{ si } SV \geq 0,02$$

Ecuaciones 2.10

La variación del peralte (SV en pie/pie) se calcula como la diferencia entre el peralte indicado en el Libro Verde de AASHTO menos el peralte real de la curva.

▪ Pendiente longitudinal

La incidencia de la pendiente longitudinal se incluye mediante un AMF que se obtiene de una tabla en función del tipo de terreno. Los AMF se aplican a la totalidad del segmento en cuestión y no se tiene en cuenta el signo de la pendiente, ya que en un segmento de dos carriles no divididos será positivo en un sentido y negativo en el otro.

La condición de base es un terreno llano, por lo cual para pendientes menores o iguales a 3% el AMF_{5r} es 1.

Si la pendiente tiene entre 3% y 6% el AMF_{5r} es 1,10 y en caso de que sea mayor a 6% el AMF_{5r} es 1,16.

▪ Densidad de accesos

La densidad de accesos se tiene en cuenta mediante un AMF que se calcula en función de la densidad de accesos (DD) del segmento en cuestión (los accesos se cuentan a ambos

lados de la vía) y del PAVDT (ecuación 2.11). La condición de base para este caso es de 5 accesos/milla. El manual indica que se deberán incluir todos los accesos usados por el tránsito para entrar o salir del camino diariamente.

$$AMF_{6r} = \frac{[0,322 + DD(0,05 - 0,005 \ln(PAVDT))]}{[0,322 + 5(0,05 - 0,005 \ln(PAVDT))]} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

- Banda sonora central

La ausencia de banda sonora central es la condición de base para cuyo caso el AMF es 1. Este AMF es válido sólo para el caso de un segmento de dos carriles no divididos cuya única separación de las direcciones de circulación sea la línea central demarcada. El AMF_{7r} es igual a 0,94 en el caso de que el segmento sí tenga banda sonora central.

- Carriles de adelantamiento

Al igual que en el caso anterior, la ausencia de carril de adelantamiento es la condición de base para la cual el AMF es 1. Si existe un carril de adelantamiento en uno de los sentidos AMF_{8r} es igual a 0,75 y si el carril de adelantamiento está en ambos sentidos el AMF_{8r} es 0,65.

- Carriles de giro izquierda bidireccionales

Los carriles de giro a la izquierda se ubican en el centro de la calzada y pueden reducir los accidentes relacionados a las maniobras de giro hacia los accesos. La condición de base es la ausencia de los mismos. El cálculo del AMF se realiza mediante la ecuación 2.12.

$$AMF_{9r} = 1 - (0,7 \times P_{dwy} \times 0,5) \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Donde:

P_{dwy} : Es la proporción del total de accidentes relativos a las maniobras de giro a los accesos y su valor se obtiene de una fórmula en función de la densidad de accesos.

- Tasa de peligrosidad de los bordes de la carretera

El índice de peligrosidad se obtiene mediante un análisis cuantitativo del borde de la carretera, en el cual se evalúa en una escala del 1 al 7 (siendo 7 el más peligroso) las características del diseño tales como la pendiente transversal, el área despejada, la presencia o no de barreras de contención, etc. El manual ofrece una serie de imágenes para realizar la evaluación. El valor del índice de peligrosidad (RHR) asignado al segmento se utiliza luego en una fórmula para obtener el AMF (ecuación 2.13).

$$AMF_{10r} = \frac{e^{(-0,6869+0,0668 \times RHR)}}{e^{-0,4865}} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

- Iluminación

La ausencia de iluminación en el segmento es la condición de base. El AMF para condiciones distintas se calcula en función de la proporción de accidentes nocturnos y las proporciones de accidentes nocturnos con heridos y de daño material solamente que ocurren en segmentos no iluminados.

$$AMF_{11r} = 1 - \left[(1 - 0,72 \times p_{inr} - 0,83 \times p_{pnr}) \times p_{nr} \right] \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Donde:

p_{inr} = proporción de accidentes total nocturnos en segmento sin iluminación con víctimas

p_{pnr} = proporción de accidentes total nocturnos en segmento sin iluminación con daño de material solamente

p_{nr} = proporción de accidentes total en segmento sin iluminación que ocurren por la noche.

El manual dispone valores de proporción de accidentes nocturnos pero se aconseja que los usuarios sustituyan estos valores estimados con los valores locales.

Tabla 2.8: Proporción de accidentes nocturnos en segmento de carretera no iluminada basado en los datos de la ciudad Washington 2002-2006.

Tipo de sitio	Proporción de accidentes total nocturnos		
	p_{inr}	p_{pnr}	p_{nr}
Segmento (2U)	0,382	0,618	0,370

- Regulación de velocidad automatizada

La ausencia de regulación de velocidad automatizada es la condición de base. Este tipo de regulación se efectúa mediante la identificación fotográfica o por video de aquéllos que exceden el límite máximo legal de velocidad. Si esta regulación existe, el AMF_{12r} es igual a 0,93.

2.4.2 Factores de modificación de accidentes para intersecciones de carretera rural de carriles

En el caso de las intersecciones de carreteras de dos carriles cuando una o más condiciones de sitio difieren de las condiciones base, los AMF son los que se detallan a continuación:

- Intersección con un ángulo de intersección (oblicua)

La condición base es 90°, las intersecciones con ángulo de inclinación que difieren a 90°, el AMF se calcula mediante las ecuaciones 2.15 y 2.16.

- Intersecciones de tres ramas controladas con la señal PARE en el entrada de la vía secundaria

$$AMF_{1i} = e^{0,004 \times \text{ángulo}} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Donde:

AMF_{1i} = el Factor de modificación de accidente por el efecto de inclinación de la intersección en los accidentes totales;

Ángulo = el ángulo de la intersección (en grados); el valor absoluto de la diferencia entre 90 grados y el ángulo de la intersección real.

- Intersecciones de cuatro ramas controladas con la señal PARE en la de la vía secundaria

$$AMF_{1i} = e^{0,0054 \times \text{ángulo}} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

Donde:

AMF_{1i} = el Factor de modificación de accidente para el efecto de inclinación de la intersección en los accidentes totales.

Ángulo = el ángulo de la intersección (en grados); el valor absoluto de la diferencia entre 90 grados y el ángulo de la intersección real.

Si el ángulo de intersección difiere para las dos ramas de las carreteras secundarias a una intersección de cuatro ramas controladas, se calculan valores de AMF_{1i} separadamente para cada rama de carretera secundaria y luego se halla el promedio.

- Intersecciones de cuatro ramas semaforizadas

Los movimientos de vehículos están controlados mediante semáforos y el riesgo de colisiones está limitado por lo tanto el AMF para las intersecciones oblicuas de cuarto ramas semaforizadas es 1,00 para todos casos.

- Intersecciones con carriles de giro izquierda - AMF_{2i}

La condición base para la intersección con carril de giro izquierda es la ausencia de carril de giro izquierda. Un AMF de 1,00 siempre ha sido usado cuando la intersección no cuenta con carril de giro izquierda. Para otras condiciones el AMF se obtiene de la tabla 2.9 en función de cantidad de entradas (accesos) con carriles de giro izquierda.

Tabla 2.9: AMF_{2i} para intersecciones con carriles de giro izquierda.

Tipo de intersección	Control de tráfico de intersección	Cantidad de entradas con carriles de giro izquierda			
		Una entrada	Dos entradas	Tres entradas	Cuatro entradas
Tres ramas	El pare en la entrada de la carretera secundaria	0,56	0,31	0	0
Cuatro ramas	El pare en la entrada de la carretera secundaria	0,72	0,52	0	0
	Semaforizada	0,82	0,67	0,55	0,45

- Intersecciones con carriles de giro derecha - AMF_{3i}

La condición base para la intersección es la ausencia de carril de giro derecha. Un AMF de 1,00 siempre ha sido usado cuando la intersección no cuenta con carril de giro derecha. Para otras condiciones el AMF se obtiene de la tabla 2.10.

Tabla 2.10: AMF_{3i} para intersecciones con carriles de giro derecha.

Tipo de intersección	Control de tráfico de intersección	Cantidad de entradas con carriles de giro izquierda			
		Una entrada	Dos entradas	Tres entradas	Cuatro entradas
Tres ramas	El pare en la entrada de la carretera secundaria	0,86	0,74	0	0
Cuatro ramas	El pare en la entrada de la carretera secundaria	0,86	0,74	0	0
	Semaforizada	0,96	0,92	0,88	0,85

- Iluminación - AMF_{4i}

La condición base es la ausencia de iluminación en la intersección. El AMF para las intersecciones con iluminación se calcula como se indica en ecuación 2.17:

$$AMF_{4i} = 1 - 0,38 \times p_{ni} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

Donde,

AMF_{4i} = el factor de modificación de accidente para el efecto de iluminación en los accidentes totales.

p_{ni} = la proporción de accidentes totales para intersecciones sin iluminación que ocurren por la noche.

Este AMF aplica para los accidentes totales de la intersección. La tabla 2.11 dispone los valores predefinidos por el p_{ni} de proporción de accidente de noche. Se recomienda que los usuarios de HSM reemplacen las estimaciones en la tabla con los valores localmente derivados.

Tabla 2.11: Proporción de accidentes nocturnos en intersecciones de carretera no iluminada basado en los datos de la ciudad Washington 2002-2006.

Tipo de intersección	Proporción de accidentes que ocurre por la noche
	p_{ni}
3ST	0,260
4ST	0,244
4SG	0,286
Basado en los datos de California (2002 -2006)	

2.5. Factor de Calibración de Accidentes (Cr)

Las frecuencias de accidentes en segmentos o intersecciones similares pueden variar de una zona a otra debido a las diferencias en clima, población de conductores, distintos cuadros de registro de accidentes y prácticas de registro de accidentes. Por ello, para compensar estas

diferencias se incluye un factor de calibración de accidentes (Cr) que considera las condiciones locales y/o geográficas del sitio en estudio.

El HSM 2010 sugiere que para obtener un valor adecuado de Cr se utilice una muestra de 30 a 50 sitios, los cuales deben sumar 100 accidentes (independientemente de la severidad) por año como mínimo (total de todos los sitios) y tener una longitud mínima recomendada de cada sitio de 160 metros (0,1 millas), suficiente para representar adecuadamente las condiciones físicas y de seguridad del lugar en proceso de calibración.

El HSM 2010 también recomienda que para aquellas regiones donde se observan diferencias topográficas y climáticas apreciables, se determine un factor para cada tipo de terreno o región geográfica.

2.6. Aplicación del método empírico Bayes (EB)

El Método de EB puede utilizarse para estimar la frecuencia media de accidentes esperados para los períodos pasados y los períodos futuros, y es usado al nivel sitio-específico o al nivel proyecto-específico.

El Método EB puede aplicarse al nivel sitio-específico, cuando se puede asignar los accidentes observados a las intersecciones específicas o a los segmentos de carretera, o al nivel del proyecto, cuando se asignan los accidentes observados en conjunto a una red vial.

Para un sitio individual el método de EB combina la frecuencia de la accidentes observados con la estimación de modelos predictivos para mejorar la fiabilidad estadística de la estimación mediante un factor de ponderación “w” que está en función del parámetro de dispersión (k) asociado a los SPFs (ecuación 2.18 y 2.19).

$$N_{esperado} = w \times N_{estimado} + (1 - w) \times N_{observado} \quad \text{Ecuación 2.18}$$

$$w = \frac{1}{1 + k \times (\sum N_{estimado})} \quad \text{Ecuación 2.19}$$

Donde:

$N_{esperado}$ = Número de accidentes esperados para un período de análisis.

$N_{estimado}$ = Número de accidentes estimados para un período de análisis

$N_{observado}$ = Número de accidentes observados para un período de análisis

w = Factor de ponderación referente a SPF

k = Parámetro de dispersión asociado a SPF

Cuando se aplica el método EB a nivel de proyecto el análisis se complica más ya que el parámetro de dispersión no es un valor único para un sitio sino para la combinación de un conjunto de sitios que conforman la red vial. Otra razón de complejidad es que no se puede asumir que los accidentes esperados para diferentes tipos de sitios son estadísticamente correlacionados. El manual proporciona hojas de cálculos y las ecuaciones (2.20, 2.21, 2.22, 2.23 y 2.24) se usan para acabar la estimación de accidentes esperados.

$$W_0 = \frac{1}{1 + \frac{N_{estimado_{w0}}}{N_{estimado(Total)}}} \text{ Ecuación 2.20}$$

$$N_0 = W_0 \times N_{estimado(Total)} + (1 - W_0) \times N_{observado(Total)} \text{ Ecuación 2.21}$$

$$W_1 = \frac{1}{1 + \frac{N_{estimado_{w1}}}{N_{estimado(Total)}}} \text{ Ecuación 2.22}$$

$$N_1 = W_1 \times N_{estimado(Total)} + (1 - W_1) \times N_{observado(Total)} \text{ Ecuación 2.23}$$

$$N_{esperado/ combinado} = \frac{N_0 + N_1}{2} \text{ Ecuación 2.24}$$

Donde:

$N_{estimado(Total)}$: Número total de accidentes estimados para la red vial de interés.

$N_{observado(Total)}$: Cantidad total de accidentes observados para la red vial de interés.

$N_{estimado_{w0}}$: Número total de accidentes durante el periodo para cual accidentes fue observados, asumiendo que la frecuencia de accidentes de distintos sitios de la carretera son estadísticamente independientes.

$N_{estimado_{w1}}$: Número total de accidentes durante el periodo para cual accidentes fue observados, asumiendo que la frecuencia de accidentes de distintos sitios de la carretera son perfectamente correlacionados.

W_0 : El peso que se coloca a la frecuencia de accidentes estimados asumiendo que la frecuencia de accidentes de distintos sitios de la carretera son estadísticamente independientes.

N_0 : Número de accidentes esperados asumiendo que la frecuencia de accidentes de distintos sitios de la carretera son estadísticamente independientes.

W_1 : El peso que se coloca a la frecuencia de accidentes estimados asumiendo que la frecuencia de accidentes de distintos sitios de la carretera son perfectamente correlacionados.

N_1 : Número de accidentes esperados asumiendo que la frecuencia de accidentes de distintos sitios de la carretera son perfectamente correlacionados.

$N_{esperado/combinado}$: La frecuencia media de accidentes esperados para los sitios de la carretera combinados.

2.7. Procedimiento del método predictivo de accidentes del HSM 2010 para vías rurales de dos carriles

El procedimiento general del método predictivo está representado en la figura 2.1, y son 18 pasos a seguir. Es posible que en algunas situaciones no se aplique ciertos pasos porque los datos no están disponibles o el paso no es aplicable en la situación de estudio. En otras situaciones, pueden repetirse los pasos, si se desea una estimación para varios sitios o para un período de varios años.

Los pasos del procedimiento se agruparon en tres etapas principales:

Etapas 1: Obtención de datos, agrupa los pasos del 1 al 8.

Etapas 2: Aplicación del método predictivo, incluye los pasos del 9 al 17.

Etapas 3: Análisis y evaluación de resultados, conformado por el paso 18.

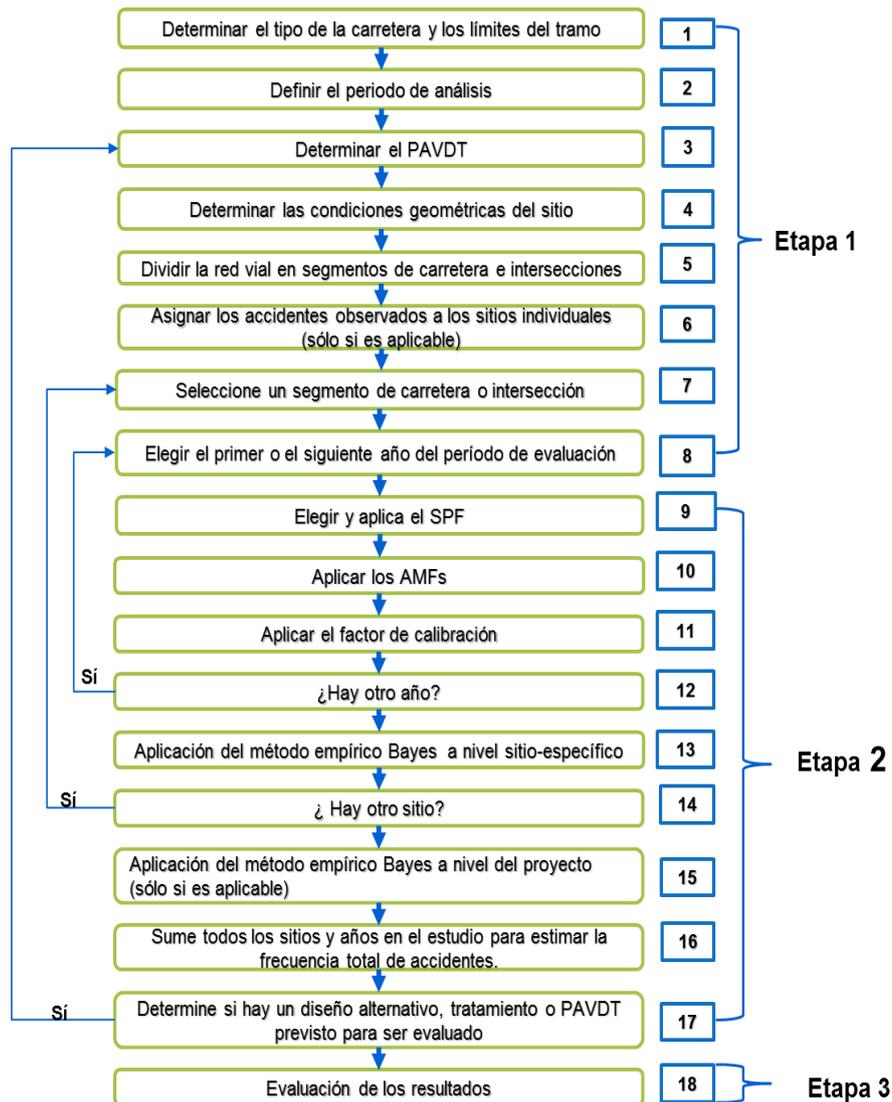


Figura 2.1 Método predictivo del HSM.

-Paso 1: Definir el tipo de la carretera y los límites del tramo. Para determinar la frecuencia media de accidentes esperada, la gravedad, y tipos de colisión serán estimados.

-Paso 2: Definir el periodo de análisis. El método predictivo puede utilizarse para un período pasado o un período futuro. Todos los períodos son medidos en años. Años de interés serán determinados por la disponibilidad de PAVDT observado o estimado; datos de accidentes observados, y los datos del diseño geométricos. Si el método predictivo se usa para un período pasado o el período futuro depende del propósito del estudio.

-Paso 3: Determinar el PAVDT. Para el período del estudio, determine la disponibilidad de promedio anual de volumen diario de tránsito (PAVDT) para una red de la carretera existente y la disponibilidad de datos de los accidentes observados para determinar si el método EB es aplicable.

El método EB sólo es aplicable cuando hay los datos de accidentes observados y son confiables para la red de carretera de estudio específica, facilidad, o sitio.

Si los datos de accidentes observados no están disponibles, entonces no se aplica los pasos 6, 13, y 15 del procedimiento del método predictivo. En este caso, la estimación de frecuencia media de accidentes esperada es limitada a usar un modelo predictivo (es decir la frecuencia media de accidentes).

-Paso 4: Determinar las condiciones geométricas del tramo. Determinar las características de diseños geométricos, características de control del tráfico, y condiciones del sitio para todos los sitios en la red del estudio.

Para determinar los datos necesarios y evitar la colección de los datos innecesaria, es prudente entender las condiciones base del SPFs. Las condiciones base están definidas para los segmentos de la carretera y para las intersecciones en epígrafe 2.3 y 2.3.2 respectivamente.

-Paso 5: Dividir la red vial en segmentos de carretera e intersecciones. Divide la red de la carretera de estudio en segmentos e intersecciones llamados "sitios". La carretera rural de dos carriles se divide en sitios representados en la tabla 2.1 de epígrafe 2.2.

-Paso 6: Asignar los accidentes observado a los sitios individual (sólo si es aplicable). Sólo se aplica el paso 6 si fue determinado en el paso 3 que el Método de EB sitio-específico es aplicable. Si el Método de EB sitio-específico no es aplicable, procede al paso 7. El criterio de asignar los accidentes a segmentos individuales de la carretera o intersecciones se presenta en la figura 2.2.

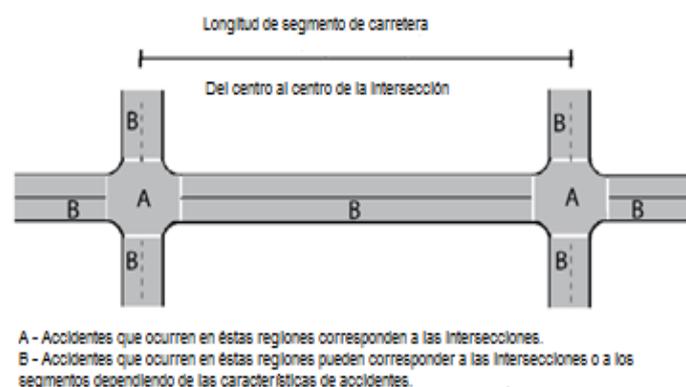


Figura 2.2: Asignación de accidentes según el HSM 2010

Accidentes que ocurren en una intersección o en una rama de la intersección y se relaciona a la presencia de una intersección, se asigna a la intersección y se usa en el método EB junto con la frecuencia media de accidentes de la intersección. Se asignan accidentes que ocurren

entre las intersecciones y no se relacionan a la presencia de una intersección al segmento de la carretera; se usan tales accidentes en el método EB junto con la frecuencia media de accidentes del segmento de la carretera.

-Paso 7: Seleccione un segmento de carretera o intersección. Si no hay más sitios para ser evaluados, procede al paso 15. En el paso 5, la red de la carretera dentro de los límites del estudio es dividida en varios sitios individuales homogéneos (las intersecciones y los segmentos de la carretera).

El resultado del método predictivo del HSM es la frecuencia media de accidentes esperados de la red entera del estudio, que es la suma de todos los sitios individuales, para cada año de estudio. Este valor será el número total de accidentes esperados a ocurrir para todos los sitios durante el período de interés. Si la frecuencia de accidentes (accidentes por año) es deseable, el resultado total puede ser dividido entre el número de años del período de interés.

-Paso 8: Elegir el primer o el siguiente año del período de evaluación. Para el sitio seleccionado, seleccione el primer o próximo año del período de interés. Si no hay más años para ser evaluados para el sitio, proceda al paso 15.

-Paso 9: Elegir y aplica el SPF. Para el sitio seleccionado, determine y aplique la función de rendimiento de seguridad apropiada (SPF) para el tipo de carretera del sitio y características de control del tráfico.

Se repiten pasos 9 a través de paso 13 para el período de evaluación de cada año como parte de la evaluación de cualquier segmento de la carretera o intersección. El modelo predictivo para segmentos de una carretera está dado por ecuación 2.1.1 en el epígrafe 2.1 y para intersecciones está dado por ecuación 2.2 en el epígrafe 2.1.2. La tabla 2.2 de epígrafe 2.2 representa las ecuaciones para calcular los SPFs de cada sitio de carretera.

-Paso 10: Aplicar los AMFs. Multiplique el resultado obtenido en paso 9 por los AMFs apropiados para ajustar la frecuencia de accidentes estimados a las características individuales del sitio en estudio.

Los AMF para las condiciones base de cada función de rendimiento de seguridad tienen un valor de 1. Cuando una o más condiciones del sitio en estudio difieren de las de base, los AMFs se calculan mediante ecuaciones representadas en epígrafe 2.3.1 y 2.3.2 en función de tipo de sitio; un segmento o intersección.

-Paso 11: Aplicar el factor de calibración. Multiplique el resultado obtenido en el paso 10 por el factor de la calibración apropiado.

Cada uno de los SPFs usados en el método predictivo se han desarrollados con los datos de los estados (países o regiones) específicos y períodos de tiempo. La calibración de los SPFs a las

condiciones locales responderá de las diferencias. Un factor de la calibración (C_r para segmento de la carretera o C_i para las intersecciones) se aplica para cada SPF en el método predictivo.

-Paso 12: ¿Hay otro año? Si hay otro año para ser evaluado en el período del estudio para el sitio seleccionado, vuelva para el paso 8. De contrario, proceda al paso 13.

-Paso 13: Aplicación del método empírico Bayes a nivel sitio-específico. Si el método EB sitio-específico es aplicable es determinado en el paso 3. El método EB sitio-específico combina los modelos predictivo de estimación de frecuencia media de accidente, $N_{estimado}$, con la frecuencia de accidentes observados del sitio específico, $N_{observado}$. Este proporciona una estimación más fiable estadísticamente de la frecuencia media de accidentes esperados del sitio seleccionado.

-Paso 14: ¿Existe otro sitio para evaluar? Si hay otro sitio para ser evaluado, vuelve al paso 7, de contrario, procede al paso 15.

-Paso 15: Aplicación del método empírico Bayes a nivel del proyecto (sólo si el método empírico Bayes sitio-específico no es aplicable). Este paso es sólo aplicable para las condiciones existentes cuando los datos de accidentes observados están disponibles, pero no pueden asignarse con precisión a los sitios específicos.

-Paso 16: Sume todos los sitios y años en el estudio para estimar la frecuencia total de accidentes. La frecuencia total estimada dentro de los límites de la red vial durante un período del estudio de 'n' años se halla mediante la ecuación 2.25:

$$N_{total} = \sum_{\text{Segmentos}} N_{rs} + \sum_{\text{Intersecciones}} N_{int} \quad \text{Ecuación 2.25}$$

N_{rs} = La frecuencia media de accidentes esperados para un segmento de la carretera determinada mediante el método predictivo para un año específico.

N_{int} = La frecuencia media de accidentes esperados para una intersección de la carretera determinada mediante el método predictivo para un año específico.

La frecuencia total media estimada dentro de los límites de la red vial durante un período del estudio de 'n' años se halla mediante la ecuación 2.26:

$$N_{totalmedia} = \frac{N_{total}}{n} \quad \text{Ecuación 2.26}$$

$N_{totalmedia}$ = La frecuencia total media de accidentes estimados para ocurrir dentro de la red definida o la facilidad limitada durante el período del estudio.

n = El número de años de período del estudio.

-Paso 17: Determine si hay un diseño alternativo, tratamiento o PAVDT previsto para ser evaluado. Pasos 3 a través de paso 16 del método predictivo se repiten apropiadamente para el mismo tramo de la carretera pero bajo condiciones alternativas, tratamientos, los períodos de interés, o PAVDTs previstos.

-Paso 18: Evaluación de los resultados. El método predictivo se usa para proporcionar una estadística de estimación fiable de la frecuencia media de accidentes esperados dentro de los límites definidos de la red vial por un período de tiempo dado, para un diseño geométrico dado y características de control del tráfico, y conocido o estimado PAVDT. Además de estimar los accidentes totales, la estimación puede hacerse para la severidad de diferente tipo de accidentes y los tipos de la colisión.

2.8. Limitaciones del método predictivo de accidentes del HSM 2010

El método predictivo es basado en investigación que usa bases de datos disponibles que describen la geometría y características de tráfico de sistemas de carreteras en los Estados Unidos. El modelo predictivo incorpora muchos efectos, pero no todos los elementos del diseño geométrico y características de tráfico de potencial interés.

Mientras que el método predictivo dirige los efectos de características físicas de una vía, sólo considera efecto de factores no-geométricos en un sentido general. Los ejemplos principales de esta limitación son:

- La población del conductor varían substancialmente de sitio a sitio en la distribución de edad, nivel de experiencia de conducir, uso de cinturón de seguridad, uso del alcohol, y otros factores de comportamiento. Para calibrar el modelo predictivo, el método considera la influencia de variaciones de estos factores para una red vial completo y no para sitio específico.
- Pueden dirigirse los efectos de condiciones climatológicas indirectamente a través del proceso de la calibración, pero no se dirigen los efectos de tiempo explícitamente.
- El método predictivo considera el promedio anual de volumen diario de tránsito, pero no considera los efectos de variaciones de volumen de tráfico durante el día o las proporciones de camiones o motocicletas; no se valoran los efectos de estos factores de tráfico totalmente.

Además, el método predictivo soluciona los efectos de diseño geométrico y de características de tráfico de forma independiente, ignorando la potencialidad de las interacciones que puede

existir. Es posible que tales interacciones existan, y deben considerarse en la aplicación del modelo. En la actualidad, no se consideran las interacciones totalmente y son difíciles de cuantificar.

2.9. Conclusiones parciales

- El método predictivo del HSM 2010 proporciona modelos para estimar la frecuencia media de accidentes en segmentos e intersecciones de carreteras y estos modelos cuentan con tres elementos; funciones de rendimiento de seguridad (SPFs), factores de modificación de accidentes (AMFs) y el factor de calibración (Cr).
- Los datos necesarios para el método predictivo son los PAVDTs, las características geométricas y de control de todos los sitios de estudio. Para determinar las características, se debe realizar un análisis de las condiciones base de segmentos e intersecciones para evitar la colección de datos innecesarios. En el caso de los segmentos la longitud de los mismos es un dato adicional a considerar.
- Los modelos predictivos determinan la frecuencia de accidentes estimados, la cual se mejora mediante el uso del método empírico Bayes que permite calcular la frecuencia de accidentes esperados combinando el número de accidentes estimados y el número de accidentes observados para un período de interés así mejorado la fiabilidad de la estimación del método predictivo.
- Existen 18 pasos para aplicar el método predictivo, en un caso específico puede no aplicar ciertos pasos por la falta de datos y en otras pueden que sí, incluso que se pueden repetir algunos pasos según la estimación deseada.

Capítulo III: Aplicación del método predictivo del HSM 2010, en carretera rural Santa Clara entronque Vueltas y el análisis de resultados

3.1. Introducción

En este capítulo se aplicó el procedimiento definido en el capítulo II en la carretera rural de dos carriles Santa Clara entronque Vueltas, en su tramo Circunvalación – Universidad para estimar la frecuencia de accidentes esperados utilizando datos estadísticos de accidentes registrados durante el año 2015. El tramo tiene una longitud de 6,28 Km; localizando el Km 0 en la rotonda (Circunvalación) y el Km 6,28 en la entrada a la facultad de Agropecuaria (Universidad).

3.2. Etapa 1: Obtención de datos

Una de las actividades importantes en la aplicación del método predictivo del HSM es dividir la red de carretera en sitios individuales llamados segmentos e intersecciones, para poder determinar las características geométricas y de control de sitios en estudio.

El tramo Circunvalación – Universidad presenta más de 30 intersecciones pero se decidió dividir la red en 7 segmentos y 7 intersecciones; considerando solamente intersecciones que da acceso a las regiones más importantes. Los sitios del tramo están representados en la figura 3.1.

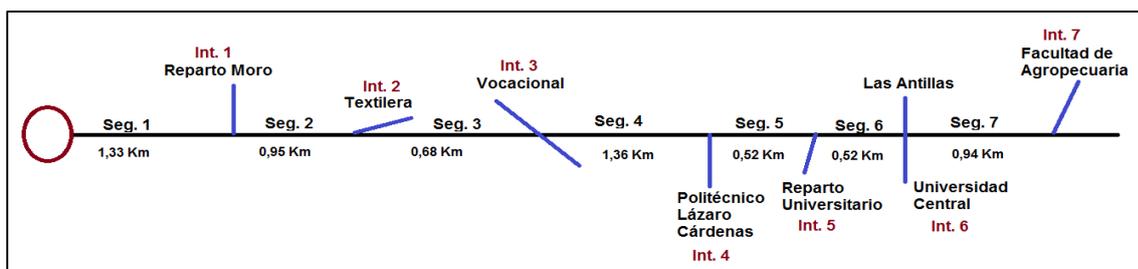


Figura 3.1: Esquema lineal de los sitios del tramo.

Se determinó las características geométricas utilizando los datos de archivo de la Empresa EMPROY Villa Clara, imágenes del programa “Google Earth” y visitas realizadas al tramo objeto de estudio. Adicionalmente se consultó la Norma cubana 853 de 2012 para chequear peraltes en curvas horizontales y (AASHTO, 1994) el llamado “Libro verde” para determinar el peralte máximo recomendado para este tipo de carreteras.

Según el libro verde el peralte máximo recomendado para carreteras rurales abiertas en zonas sin nieve y hielo es de 0,10 aunque puede usarse también una tasa de peralte máxima

de 0,12 pero ésta último está más allá de los límites prácticos para carreteras abiertas según la práctica corriente. Basado en este criterio en este trabajo se utilizó $e_{m\acute{a}x} = 0,10$ m/m (10%).

También se utilizó las figuras del HSM para determinar valores de la tasa de peligrosidad de los bordes de la carretera.

Los datos del PAVDTs y las pendientes longitudinales del tramo fueron obtenidos del trabajo de Diploma (Domínguez, 2015), mientras los de accidentes observados se obtuvo de informe de la situación operativa del tránsito de año 2015 perteneciendo a la Unidad Provincial de Tránsito de la provincia Villa Clara.

Según informe operativo del cierre del año 2015 de la Unidad Provincial de Tránsito en el período del año 2015, en el tramo ocurrieron 31 accidentes pero no existe información exacta de asignar accidentes a los sitios específicos. Como no se pudo ubicar los accidentes a los sitios individuales (paso 6 del procedimiento), el método EB al nivel sitio-específico (paso 13) no es aplicable. En cambio se aplicó el método EB a nivel del proyecto.

Se utilizó el factor de calibración (Cr) igual a 1,00; ya que el HSM (2010) sugiere que para obtener un valor adecuado de Cr se utiliza una muestra de 30 a 50 sitios, los cuales deben sumar 100 accidentes por año como mínimo y tener una longitud mínima recomendada de cada sitio de 160 metros (0,1 millas), suficiente para representar adecuadamente las condiciones físicas y de seguridad del lugar en proceso de calibración. El tramo de estudio tiene en total 14 sitios individuales, la cantidad mucho menor que la recomendada. Además no se pudo asignar los accidentes a los puntos específicos de ocurrencia, que tampoco suman 100 (valor mínimo de accidentes independientes).

3.3. Etapa 2: Aplicación del método predictivo en los distintos sitios de la carretera

3.3.1 Aplicación del método predictivo en los segmentos de la carretera:

Para organizar mejor el trabajo se agruparon los datos principales según las condiciones base de los segmentos en una sola tabla y luego se aplicó los pasos dentro de esta etapa para cada segmento de forma independiente. Las características geométricas y de control para ambos segmentos se han resumido en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Características geométricas y de control para los segmentos.

Características geométricas y de control	Condiciones reales						
	Segmento 1	Segmento 2	Segmento 3	Segmento 4	Segmento 5	Segmento 6	Segmento 7
Ancho de carril	3,15 m	3,15 m	3,15 m	3,13 m	3,10 m	3,10 m	3,10 m
Ancho de paseo	1,50 m	1,50 m	1,20 m	1,35 m	1,50 m	1,50 m	1,50 m
Tipo de paseo	Compuesta	Compuesta	Compuesta	Compuesta	No pavimentado	Compuesta	Compuesta
Curvatura horizontal	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Variación de peralte	<0,01	<0,01	>0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Pendiente longitudinal	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%
Densidad de acceso	16/mi	14/mi	17/mi	12/mi	9/mi	13/mi	3/mi
Banda central sonora	No	No	No	No	No	No	No
Carriles de adelantamiento	No	No	No	No	No	No	No
Carriles de giro izquierda bidireccionales	No	No	No	No	No	No	No
Tasa de peligrosidad de los bordes de la carretera	4	3	3	3	3	3	3
Iluminación	Sí	No	No	No	No	No	No
Regulación de velocidad automatizada	No	No	No	No	No	No	No
Otros datos requeridos							
PAVDT (veh/día)	4 232	4 324	3 975	3 975	3 100	3 100	3 100
Longitud (Km)	1,33	0,95	0,68	1,36	0,52	0,52	0,94

La conversión de unidades utilizadas en el trabajo se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Conversión de unidades para longitudes

1 Km = 1000 m
1 pie = 0,3048 m
1 mi = 1609,34 m
1 mi = 1,60934 Km

❖ Segmento de Circunvalación hasta la entrada de Reparto Moro

Datos fundamentales del segmento

- Longitud del segmento = 1,33 Km = 0,826425 mi ≈ 0,83 mi
- PAVDT = 4 232 veh/día
- 6 curvas: 4 curvas circulares y 2 curvas de transición
- 13 accesos
- Pendiente longitudinal: 0,85%

-Paso 9: Elegir y aplicar el SPF correspondiente

$$N_{spf_{rs}} = PAVDT \times L \times 365 \times 10^{-6} \times e^{-0,312} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

$$= 4232 \times 0,83 \times 365 \times 10^{-6} \times e^{-0,312}$$

$$= 0,9385 \text{ accidentes/año}$$

$$k = \frac{0,236}{L}$$

$$= \frac{0,236}{0,830} = 0,284$$

-Paso 10: Aplicar los AMFs

- Ancho de carril: $AMF_{1r} = (AMF_{ra} - 1) \times p_{ra} + 1$ Ecuación 2.7

$$AMF_{ra} = 1,3 \text{ (Tabla 2.5); } p_{ra} = 57,4\%$$

$$AMF_{1r} = (1,3 - 1) \times 0,574 + 1 = 1,17$$

- Ancho y tipo de paseo: $AMF_{2r} = (AMF_{wra} \times AMF_{tra} - 1) \times p_{ra} + 1$ Ecuación 2.8

$$AMF_{wra} = 1,15 \text{ (Tabla 2.6); } AMF_{tra} = 1,03 \text{ (Tabla 2.7); } p_{ra} = 57,4\%$$

$$= (1,15 \times 1,03 - 1) \times 0,574 + 1 = 1,11$$

- Curvas horizontales: El segmento tiene 6 curvas cuyas propiedades están representada en la tabla 3.3: 4 curvas circulares y 2 curvas con transición.

Tabla 3.3: Propiedades de las curvas del segmento No.1

Curva	Propiedades	Curva	Propiedades
Curva 1	Circular Lc=133,31m = 0,083mi R=463,81m = 1521,67 pies S=10%	Curva 4	Circular Lc=124,13m = 0,077mi R=364,37m = 1195,44 pies S=10%
Curva 2	De transición Lc=224,65m = 0,140mi R=581,99m = 1909,42 pies S=10%	Curva 5	De transición Lc= 99,90m = 0,062mi R=216,96m = 711,81 pies S=10%
Curva 3	Circular Lc=128,78m = 0,080mi R=374,71m = 1229,36 pies S=10%	Curva 6	Circular Lc=120,92m = 0,075mi R=324,26m = 1063,85 pies S=10%

Curva horizontal 1:

$$AMF_{3r} = \frac{1,55 \times L_c + \left(\frac{80,2}{R}\right) - 0,012 \times S}{1,55L_c} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

$$= \frac{1,55 \times 0,517 + \left(\frac{80,2}{1521,67}\right) - 0,012 \times 0}{1,55 \times 0,517} = 1,07$$

Curva horizontal 2: $AMF_{3r} = 1,04$

Curva horizontal 3: $AMF_{3r} = 1,08$

Curva horizontal 4: $AMF_{3r} = 1,08$

Curva horizontal 5: $AMF_{3r} = 1,13$

Curva horizontal 6: $AMF_{3r} = 1,09$

$$AMF_{3r_{promedio}} = 1,08$$

- Peralte: Todas las curvas tiene el peralte real de 0,10 (10%) que coincide con el recomendado por el Libro Verde ($e_{m\acute{a}x}$ 10%) por lo tanto el AMF_{4r} es 1,00 para cada curva, luego $AMF_{4r} = 1,00$.
- Pendiente longitudinal: la condición base es un terreno bien llano, por lo cual para pendientes menores o iguales a 3% el AMF_{5r} es 1,00.
- Densidad de accesos:

$$AMF_{6r} = \frac{[0,322 + DD(0,05 - 0,005 \ln(PAVDT))]}{[0,322 + 5(0,05 - 0,005 \ln(PAVDT))]} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

$$= \frac{[0,322 + 16(0,05 - 0,005 \ln(4232))]}{[0,322 + 5(0,05 - 0,005 \ln(4232))]} = 1,25$$

- Banda sonora central: $AMF_{7r} = 1,00$ ya que no cuenta con banda sonora central.
- Carriles de adelantamiento: $AMF_{8r} = 1,00$; el segmento no tiene carriles de adelantamiento.
- Carriles de giro izquierda bidireccionales: $AMF_{9r} = 1,00$; no existe carriles de giro izquierda bidireccionales
- Tasa de peligrosidad de los bordes de la carretera:

$$AMF_{10r} = \frac{e^{(-0,6869+0,0668 \times RHR)}}{e^{-0,4865}} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

$$= \frac{e^{(-0,6869+0,0668 \times 4)}}{e^{-0,4865}} = 1,07$$

- Iluminación: $AMF_{11r} = 1 - [(1 - 0,72 \times p_{inr} - 0,83 \times p_{pnr}) \times p_{nr}]$ Ecuación 2.14

$P_{inr}=0,382$ (Tabla 2.8); $p_{pnr}=0,618$ (Tabla 2.8); $P_{nr}=0,370$ (Tabla 2.8)

$$=1 - [(1 - 0,72 \times 0,382 - 0,83 \times 0,618) \times 0,370] = 0,92$$

- Regulación de velocidad automatizada: $AMF_{12r}=1,00$; no existe regulación de velocidad automatizada.

Se utilizó hojas de cálculo mediante el programa de Excel para determinar el factor de modificación de accidentes combinado. Para este segmento la tabla 3.4 muestra los resultados.

Tabla 3.4: Factores de modificación de accidentes del segmento No.1

Factores de modificación de accidentes para segmentos de carretera rural de dos carriles												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
AMF_{1r}	AMF_{2r}	AMF_{3r}	AMF_{4r}	AMF_{5r}	AMF_{6r}	AMF_{7r}	AMF_{8r}	AMF_{9r}	AMF_{10r}	AMF_{11r}	AMF_{12r}	AMF_{Comb}
1.17	1.11	1.08	1	1	1.25	1	1	1	1.07	0.92	1	1.73

-Paso 11: Aplicar el factor de calibración

Se utilizó hojas de cálculo mediante el programa de Excel para calcular el número de accidentes estimados, multiplicando el resultado obtenido por el modelo predictivo por el factor de modificación de accidentes combinado y por el factor de calibración. Para este segmento la tabla 3.5 muestra los resultados.

Tabla 3.5: Resultados de accidentes estimados para el segmento No.1

Accidentes para segmentos de carretera rural de dos carriles							
1	2	3	4	5	6	7	8
Nivel de gravedad de accidente	$N_{spf rs}$	k	Distribución de gravedad	$N_{spf rs}$ por distribución de gravedad	AMF_{Comb}	C_r	$N_{estimados}$
Total (FI+PDO)	0.939	0.28	1	0.939	1.73	1	1.624
Accidentes mortales y con lesiones (FI)			0.321	0.301	1.73	1	0.521
Sólo daños materiales (PDO)			0.679	0.638	1.73	1	1.103

❖ Segmento entre la entrada de Reparto Moro hasta la entrada a la Combinado Textil Desembarco de Granma (Textilera)

Datos fundamentales del segmento:

- Longitud del segmento = 0,95 Km = 0,59 mi
- PAVDT = 4 232 veh/día
- 2 curvas: 1 curva circular y 1 curva con transición
- 8 accesos
- Pendiente longitudinal: -2,72%

-Paso 9: Elegir y aplicar el SPF correspondiente

$N_{spf rs}=0,6670$ accidentes/año

$k = 0,40$

-Paso 10: Aplicar los AMFs

- Ancho de carril: $AMF_{1r} = 1,17$
- Ancho y tipo de paseo: $AMF_{2r} = 0,11$
- Curvas horizontales: el segmento tiene 2 curvas cuyas propiedades están representada en la tabla 3.6: 1 curva circular y 1 curva de transición.

Tabla 3.6: Propiedades de las curvas del segmento No.2

Curva	Propiedades	Curva	Propiedades
Curva 1	Circular Lc=196,0m = 0,122mi R=4213,64m = 13824,28 pies S=10%	Curva 2	De transición Lc=204,66m = 0,127mi R=327,78m = 1075,39 pies S=10%

Curva horizontal 1: $AMF_{3r} = 0,0058$

Curva horizontal 2: $AMF_{3r} = 0,043$

$AMF_{3r\text{promedio}} = 0,024$; valor menor que 1,00, según el manual cuando este factor no excede 1,00 se toma el $AMF_{3r\text{promedio}} = 1,00$.

- Peralte: todas las curvas tiene el peralte real de 0,10 (10%) que coincide con el recomendado por el Libro Verde ($e_{m\acute{a}x}$ 10%) por lo tanto el AMF_{4r} es 1,00 para cada curva, luego $AMF_{4r\text{promedio}} = 1,00$.
- Pendiente longitudinal: la condición base es un terreno bien llano, por lo cual para pendientes menores o iguales a 3% el AMF_{5r} es 1,00.
- Densidad de accesos: $AMF_{6r} = 1,20$
- Banda sonora central: $AMF_{7r} = 1,00$ ya que no cuenta con banda sonora central.
- Carriles de adelantamiento: $AMF_{8r} = 1,00$; el segmento no tiene carriles de adelantamiento.
- Carriles de giro izquierda bidireccionales: $AMF_{9r} = 1,00$; no existe carriles de giro izquierda bidireccionales

- Tasa de peligrosidad de los bordes de la carretera: $RHR = 3$, coincide con la condición base. $AMF_{10r} = 1,00$
- Iluminación: $AMF_{11r} = 1,00$; no hay iluminación en el tramo.
- Regulación de velocidad automatizada: $AMF_{12r} = 1,00$; no existe regulación de velocidad automatizada.

El resumen de los factores de modificación de accidentes y el factor de modificación de accidentes combinado se muestra en la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Factores de modificación de accidentes del segmento No.2

Factores de modificación de accidentes para segmentos de carretera rural de dos carriles												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
AMF_{1r}	AMF_{2r}	AMF_{3r}	AMF_{4r}	AMF_{5r}	AMF_{6r}	AMF_{7r}	AMF_{8r}	AMF_{9r}	AMF_{10r}	AMF_{11r}	AMF_{12r}	AMF_{Comb}
1.17	1.11	1	1	1	1.2	1	1	1	1	1	1	1.56

-Paso 11: Aplicar el factor de calibración

La frecuencia de accidentes estimados mediante el modelo afectado por el factor de calibración se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8: Resultados de accidentes estimados para el segmento No.2

Accidentes para segmentos de carretera rural de dos carriles							
1	2	3	4	5	6	7	8
Nivel de gravedad de accidente	$N_{spf_{rs}}$	k	Distribución de gravedad	$N_{spf_{rs}}$ por distribución de gravedad	AMF_{Comb}	C_e	$N_{estimados}$
Total (FI+PDO)	0.667	0.4	1	0.667	1.56	1	1.041
Accidentes mortales y con lesiones (FI)			0.321	0.214	1.56	1	0.334
Sólo daños materiales (PDO)			0.679	0.453	1.56	1	0.707

❖ Segmento entre la entrada a la Combinado Textil Desembarco de Granma hasta la entrada al Instituto Preuniversitario Vocacional de Ciencias

Datos fundamentales del segmento

- Longitud del segmento = 0,68 Km = 0,42 mi
- PAVDT = 3 975 veh/día
- 3 curvas circulares
- 7 accesos
- Pendiente longitudinal: -0,958%

-Paso 9: Elegir y aplicar el SPF correspondiente

$N_{spf_{rs}} = 0,4460$ accidentes/año

$k = 0,56$

-Paso 10: Aplicar los AMFs

- Ancho de carril: $AMF_{1r} = 1,17$
- Ancho y tipo de paseo: $AMF_{2r} = 1,11$
- Curvas horizontales: el segmento tiene 3 curvas circulares cuyas propiedades están representada en la tabla 3.9.

Tabla 3.9: Propiedades de las curvas del segmento No.3

Curva	Propiedades	Curva	Propiedades
Curva 1	Circular Lc=62,78m = 0,039mi R=163,52m = 536,48 pies S=10%	Curva 3	Circular Lc=81,82m = 0,051mi R=678,32m = 2225,46 pies S=10%
Curva 2	Circular Lc=45,21m = 0,028mi R=98,58m = 323,43 pies S=6%		

Curva horizontal 1: $AMF_{3r} = 1,82$

Curva horizontal 2: $AMF_{3r} = 2.36$

Curva horizontal 3: $AMF_{3r} = 1,20$

$$AMF_{3r_{promedio}} = 1,79$$

- Peralte: la curva 1 y la 3 tiene el peralte real de 0,10 (10%) que coincide con el recomendado por el Libro Verde ($e_{m\acute{a}x}$ 10%) por lo tanto el AMF_{4r} es 1,00 para cada curva.

Para la curva 2, la variación del peralte (SV): $0,10-0.06=0,04$ luego:

$$AMF_{4r} = 1,06+3(SV-0,02)$$

$$AMF_{4r} = 1,06+3(0,04-0,02) = 1,12$$

$$AMF_{4r_{promedio}} = 1,04$$

- Pendiente longitudinal: la condición base es un terreno bien llano, por lo cual para pendientes menores o iguales a 3% el AMF_{5r} es 1,00.
- Densidad de accesos: $AMF_{6r} = 1,28$

- Banda sonora central: $AMF_{7r}=1,00$ ya que no cuenta con banda sonora central.
- Carriles de adelantamiento: $AMF_{8r}=1,00$; el segmento no tiene carriles de adelantamiento.
- Carriles de giro izquierda bidireccionales: $AMF_{9r}=1,00$; no existe carriles de giro izquierda bidireccionales
- Tasa de peligrosidad de los bordes de la carretera: $RHR=3$, coincide con la condición base. $AMF_{10r}=1,00$
- Iluminación: $AMF_{11r}=1,00$; no hay iluminación en el tramo.
- Regulación de velocidad automatizada: $AMF_{12r}=1,00$; no existe regulación de velocidad automatizada.

El resumen de los factores de modificación de accidentes y el factor de modificación de accidentes combinado se muestra en la tabla 3.10.

Tabla 3.10: Factores de modificación de accidentes del segmento No.3

Factores de modificación de accidentes para segmentos de carretera rural de dos carriles												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
AMF_{1r}	AMF_{2r}	AMF_{3r}	AMF_{4r}	AMF_{5r}	AMF_{6r}	AMF_{7r}	AMF_{8r}	AMF_{9r}	AMF_{10r}	AMF_{11r}	AMF_{12r}	AMF_{Comb}
1.17	1.11	1.79	1.04	1	1.28	1	1	1	1	1	1	3.09

-Paso 11: Aplicar el factor de calibración

La frecuencia de accidentes estimados mediante el modelo afectado por el factor de calibración se muestra en la tabla 3.11.

Tabla 3.11: Resultados de accidentes estimados para el segmento No.3

1	2	3	4	5	6	7	8
Nivel de gravedad de accidente	N_{spfrs}	k	Distribución de gravedad	N_{spfrs} por distribución de gravedad	AMF_{Comb}	C_r	$N_{estimados}$
Total (FI+PDO)	0.446	0.56	1	0.446	3.09	1	1.378
Accidentes mortales y con lesiones (FI)			0.321	0.143	3.09	1	0.442
Sólo daños materiales (PDO)			0.679	0.303	3.09	1	0.936

❖ Segmento desde la carretera al Instituto Preuniversitario Vocacional de Ciencias hasta la carretera al Instituto Politécnico Lázaro Cárdenas del Río.

Datos fundamentales del segmento

- Longitud del segmento = 1,36 Km = 0,85 mi
- PAVDT = 3 975 veh/día
- 3 curvas: 2 curvas circulares y 1 curva con transición

- 10 accesos
- Pendiente longitudinal: -0,735%.

-Paso 9: Elegir y aplicar el SPF correspondiente

$$N_{spf\ rs} = 0,9027 \text{ accidentes/año}$$

$$k = 0,278$$

-Paso 10: Aplicar los AMFs

- Ancho de carril: $AMF_{1r} = 1,17$
- Ancho y tipo de paseo: $AMF_{2r} = 1,11$
- Curvas horizontales: el segmento tiene 3 curvas cuyas propiedades están representada en la tabla 3.12: 2 curvas circulares y 1 curva de transición.

Tabla 3.12: Propiedades de las curvas del segmento No.4

Curva	Propiedades	Curva	Propiedades
Curva 1	De transición Lc=89,16m =0,055 mi R=296,96m = 974,28 pies S=10%	Curva 3	Circular Lc=166,69m = 0,104mi R=508,39m = 1667,95 pies S=10%
Curva 2	Circular Lc=103,74m = 0,064mi R=962,04m = 3156,30 pies S=10%		

Curvatura horizontal 1: $AMF_{3r} = 1,20$

Curvatura horizontal 2: $AMF_{3r} = 1.07$

Curvatura horizontal 3: $AMF_{3r} = 1,14$

$$AMF_{3r\ promedio} = 1,14$$

- Peralte: todas las curvas tiene el peralte real de 0,10 (10%) que coincide con el recomendado por el Libro Verde ($e_{m\acute{a}x}$ 10%) por lo tanto el AMF_{4r} es 1,00 para cada curva, luego $AMF_{4r\ promedio} = 1,00$.
- Pendiente longitudinal: la condición base es un terreno bien llano, por lo cual para pendientes menores o iguales a 3% el AMF_{5r} es 1,00.

- Densidad de accesos: $AMF_{6r} = 1,16$
- Banda sonora central: $AMF_{7r} = 1,00$ ya que no cuenta con banda sonora central.
- Carriles de adelantamiento: $AMF_{8r} = 1,00$; el segmento no tiene carriles de adelantamiento.
- Carriles de giro izquierda bidireccionales: $AMF_{9r} = 1,00$; no existe carriles de giro izquierda bidireccionales
- Tasa de peligrosidad de los bordes de la carretera: $RHR = 3$, coincide con la condición base. $AMF_{10r} = 1,00$
- Iluminación: $AMF_{11r} = 1,00$; no hay iluminación en el tramo.
- Regulación de velocidad automatizada: $AMF_{12r} = 1,00$; no existe regulación de velocidad automatizada.

El resumen de los factores de modificación de accidentes y el factor de modificación de accidentes combinado se muestra en la tabla 3.13.

Tabla 3.13: Factores de modificación de accidentes del segmento No.4

Factores de modificación de accidentes para segmentos de carretera rural de dos carriles												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
AMF_{1r}	AMF_{2r}	AMF_{3r}	AMF_{4r}	AMF_{5r}	AMF_{6r}	AMF_{7r}	AMF_{8r}	AMF_{9r}	AMF_{10r}	AMF_{11r}	AMF_{12r}	AMF_{Comb}
1.17	1.11	1.14	1	1	1.16	1	1	1	1	1	1	1.72

-Paso 11: Aplicar el factor de calibración

La frecuencia de accidentes estimados mediante el modelo afectado por el factor de calibración se muestra en la tabla 3.14.

Tabla 3.14: Resultados de accidentes estimados para el segmento No.4

Accidentes para segmentos de carretera rural de dos carriles							
1	2	3	4	5	6	7	8
Nivel de gravedad de accidente	N_{spfrs}	k	Distribución de gravedad	N_{spfrs} por distribución de gravedad	AMF_{Comb}	C_r	$N_{estimado_{rs}}$
Total (FI+PDO)	0.903	0.28	1	0.903	1.72	1	1.553
Accidentes mortales y con lesiones (FI)			0.321	0.29	1.72	1	0.499
Sólo daños materiales (PDO)			0.679	0.613	1.72	1	1.055

❖ Segmento desde la carretera al Instituto Politécnico Lázaro Cárdenas del Río hasta la primera calle para el Reparto Universitario

Datos fundamentales del segmento

- Longitud del segmento = 0,52 Km = 0,32 mi
- PAVDT = 3 100 veh/día

- 2 curvas circulares
- 3 accesos
- Pendiente longitudinal: -1,563%

-Paso 9: Elegir y aplicar el SPF correspondiente

$$N_{spf\ rs} = 0,2650 \text{ accidentes/año}$$

$$k = 0,74$$

-Paso 10: Aplicar los AMFs

- Ancho de carril: $AMF_{1r} = 1,17$
- Ancho y tipo de paseo: $AMF_{2r} = 1,09$
- Curvas horizontales: el segmento tiene 2 curvas circulares cuyas propiedades están representada en la tabla 3.15.

Tabla 3.15: Propiedades de las curvas del segmento No.5

Curva	Propiedades	Curva	Propiedades
Curva 1	Circular Lc=86,60m =0,054 mi R=329,01m = 1079,43 pies S=10%	Curva 2	Circular Lc=128,84m =0,080 mi R=118,94m = 390,22 pies S=10%

Curvatura horizontal 1: $AMF_{3r} = 1,36$

Curvatura horizontal 2: $AMF_{3r} = 1,99$

$$AMF_{3r\ promedio} = 1,68$$

- Peralte: todas las curvas tiene el peralte real de 0,10 (10%) que coincide con el recomendado por el Libro Verde ($e_{m\acute{a}x}$ 10%) por lo tanto el AMF_{4r} es 1,00 para cada curva, luego $AMF_{4r\ promedio} = 1,00$.
- Pendiente longitudinal: la condición base es un terreno bien llano, por lo cual para pendientes menores o iguales a 3% el AMF_{5r} es 1,00.
- Densidad de accesos: $AMF_{6r} = 1,11$
- Banda sonora central: $AMF_{7r} = 1,00$ ya que no cuenta con banda sonora central.

- Carriles de adelantamiento: $AMF_{8r} = 1,00$; el segmento no tiene carriles de adelantamiento.
- Carriles de giro izquierda bidireccionales: $AMF_{9r} = 1,00$; no existe carriles de giro izquierda bidireccionales
- Tasa de peligrosidad de los bordes de la carretera: $RHR = 3$, coincide con la condición base. $AMF_{10r} = 1,00$
- Iluminación: $AMF_{11r} = 1,00$; no hay iluminación en el tramo.
- Regulación de velocidad automatizada: $AMF_{12r} = 1,00$; no existe regulación de velocidad automatizada.

El resumen de los factores de modificación de accidentes y el factor de modificación de accidentes combinado se muestra en la tabla 3.16.

Tabla 3.16: Factores de modificación de accidentes del segmento No.5

Factores de modificación de accidentes para segmentos de carretera rural de dos carriles												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
AMF_{1r}	AMF_{2r}	AMF_{3r}	AMF_{4r}	AMF_{5r}	AMF_{6r}	AMF_{7r}	AMF_{8r}	AMF_{9r}	AMF_{10r}	AMF_{11r}	AMF_{12r}	AMF_{Comb}
1.17	1.09	1.68	1	1	1.11	1	1	1	1	1	1	2.38

-Paso 11: Aplicar el factor de calibración

La frecuencia de accidentes estimados mediante el modelo afectado por el factor de calibración se muestra en la tabla 3.17.

Tabla 3.17: Resultados de accidentes estimados para el segmento No.5

Accidentes para segmentos de carretera rural de dos carriles							
1	2	3	4	5	6	7	8
Nivel de gravedad de accidente	$N_{sp/rs}$	k	Distribución de gravedad	$N_{sp/rs}$ por distribución de gravedad	AMF_{Comb}	C_r	$N_{estimado_{rs}}$
Total (FI+PDO)	0.265	0.74	1	0.265	2.38	1	0.631
Accidentes mortales y con lesiones (FI)			0.321	0.085	2.38	1	0.202
Sólo daños materiales (PDO)			0.679	0.179	2.38	1	0.428

❖ Segmento desde la calle de Reparto Universitario hasta la puerta de la Universidad Central de Las Villas

Datos fundamentales del segmento:

- Longitud del segmento = 0,52 Km = 0,32 mi
- PAVDT = 3 100 veh/día
- 1 curva circular
- 4 accesos
- Pendiente longitudinal: -0,56%

-Paso 9: Elegir y aplicar el SPF correspondiente

$$N_{spf_{rs}} = 0,2650 \text{ accidentes/año}$$

$$k = 0,74$$

-Paso 10: Aplicar los AMFs

- Ancho de carril: $AMF_{1r} = 1,17$
- Ancho y tipo de paseo: $AMF_{2r} = 1,11$
- Curvatura horizontal: el segmento tiene 1 curva circular cuyas propiedades están representada en la tabla 3.18.

Tabla 3.18: Propiedades de la curva del segmento No.6

Curva	Propiedades
Curva 1	Circular Lc=120,89m =0,075 mi R=249,36m = 818,11 pies S=10%

- Curva horizontal 1: $AMF_{3r} = 1,84$
- Peralte: la curva tiene el peralte real de 0,10 (10%) que coincide con el recomendado por el Libro Verde ($e_{m\acute{a}x}$ 10%) por lo tanto el AMF_{4r} es 1,00.
- Pendiente longitudinal: la condición base es un terreno bien llano, por lo cual para pendientes menores o iguales a 3% el AMF_{5r} es 1,00.
- Densidad de accesos: $AMF_{6r} = 1,21$
- Banda sonora central: $AMF_{7r} = 1,00$ ya que no cuenta con banda sonora central.
- Carriles de adelantamiento: $AMF_{8r} = 1,00$; el segmento no tiene carriles de adelantamiento.
- Carriles de giro izquierda bidireccionales: $AMF_{9r} = 1,00$; no existe carriles de giro izquierda bidireccionales
- Tasa de peligrosidad de los bordes de la carretera: $RHR = 3$, coincide con la condición base. $AMF_{10r} = 1,00$

- Iluminación: $AMF_{11r} = 1,00$; no hay iluminación en el tramo.
- Regulación de velocidad automatizada: $AMF_{12r} = 1,00$; no existe regulación de velocidad automatizada.

El resumen de los factores de modificación de accidentes y el factor de modificación de accidentes combinado se muestra en la tabla 3.19.

Tabla 3.19: Factores de modificación de accidentes del segmento No.6

Factores de modificación de accidentes para segmentos de carretera rural de dos carriles												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
AMF_{1r}	AMF_{2r}	AMF_{3r}	AMF_{4r}	AMF_{5r}	AMF_{6r}	AMF_{7r}	AMF_{8r}	AMF_{9r}	AMF_{10r}	AMF_{11r}	AMF_{12r}	AMF_{Comb}
1.17	1.11	1.84	1	1	1.21	1	1	1	1	1	1	2.89

-Paso 11: Aplicar el factor de calibración

La frecuencia de accidentes estimados mediante el modelo afectado por el factor de calibración se muestra en la tabla 3.20

Tabla 3.20: Resultados de accidentes estimados para el segmento No.6

Accidentes para segmentos de carretera rural de dos carriles							
1	2	3	4	5	6	7	8
Nivel de gravedad de accidente	$N_{spf_{rs}}$	k	Distribución de gravedad	$N_{spf_{rs}}$ por distribución de gravedad	AMF_{Comb}	C_r	$N_{estimado_{rs}}$
Total (FI+PDO)	0.265	0.74	1	0.265	2.89	1	0.766
Accidentes mortales y con lesiones (FI)			0.321	0.085	2.89	1	0.246
Sólo daños materiales (PDO)			0.679	0.179	2.89	1	0.52

❖ Segmento desde la puerta de la Universidad hasta la puerta a la Facultad de Agropecuaria

Datos fundamentales del segmento

- Longitud del segmento = 0,94 Km = 0,58 mi
- PAVDT = 3 100 veh/día
- 3 curvas circulares
- 2 acceso
- Pendiente longitudinal: -0.655%

-Paso 9: Elegir y aplicar el SPF correspondiente

$$N_{spf_{rs}} = 0,4804 \text{ accidentes/año}$$

$$k = 0,41$$

-Paso 10: Aplicar los AMFs

- Ancho de carril: $AMF_{1r} = 1,17$

- Ancho y tipo de paseo: $AMF_{2r} = 1,11$
- Curvas horizontales: El segmento tiene 3 curvas circulares cuyas propiedades están representada en la tabla 3.21.

Tabla 3.21: Propiedades de las curvas del segmento No.7

Curva	Propiedades	Curva	Propiedades
Curva 1	Circular Lc=76,63m = 0,048mi R=896,14m = 2940,09 pies S=10%	Curva 3	Circular Lc=171,19m =0,106 mi R=686,58m = 2252,56 pies S=10%
Curva 2	Circular Lc=110,79m = 0,069mi R=238,205m = 781,51 pies S=10%		

Curvatura horizontal 1: $AMF_{3r} = 1,08$

Curvatura horizontal 2: $AMF_{3r} = 1,30$

Curvatura horizontal 3: $AMF_{3r} = 1,10$

$$AMF_{3r_{promedio}} = 1,16$$

- Peralte: todas las curvas tiene el peralte real de 0,10 (10%) que coincide con el recomendado por el Libro Verde ($e_{máx}$ 10%) por lo tanto el AMF_{4r} es 1,00 para cada curva, luego $AMF_{4r_{promedio}} = 1,00$.
- Pendiente longitudinal: la condición base es un terreno bien llano, por lo cual para pendientes menores o iguales a 3% el AMF_{5r} es 1,00.
- Densidad de accesos: 3 accesos/mi <5 accesos/mi que es la condición base por lo tanto el $AMF_{6r} = 1,00$.
- Banda sonora central: $AMF_{7r} = 1,00$ ya que no cuenta con banda sonora central.
- Carriles de adelantamiento: $AMF_{8r} = 1,00$; el segmento no tiene carriles de adelantamiento.
- Carriles de giro izquierda bidireccionales: $AMF_{9r} = 1,00$; no existe carriles de giro izquierda bidireccionales

- Tasa de peligrosidad de los bordes de la carretera: $RHR = 3$, coincide con la condición base. $AMF_{10r} = 1,00$
- Iluminación: $AMF_{11r} = 1,00$; no hay iluminación en el tramo.
- Regulación de velocidad automatizada: $AMF_{12r} = 1,00$; no existe regulación de velocidad automatizada.

El resumen de los factores de modificación de accidentes y el factor de modificación de accidentes combinado se muestra en la tabla 3.22.

Tabla 3.22: Factores de modificación de accidentes del segmento No.7

Factores de modificación de accidentes para segmentos de carretera rural de dos carriles												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
AMF_{1r}	AMF_{2r}	AMF_{3r}	AMF_{4r}	AMF_{5r}	AMF_{6r}	AMF_{7r}	AMF_{8r}	AMF_{9r}	AMF_{10r}	AMF_{11r}	AMF_{12r}	AMF_{Comb}
1.17	1.11	1.16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.51

-Paso 11: Aplicar el factor de calibración

La frecuencia de accidentes estimados mediante el modelo afectado por el factor de calibración se muestra en la tabla 3.23.

Tabla 3.23: Resultados de accidentes estimados para el segmento No.7

Accidentes para segmentos de carretera rural de dos carriles							
1	2	3	4	5	6	7	8
Nivel de gravedad de accidente	N_{sprs}	k	Distribución de gravedad	N_{sprs} por distribución de gravedad	AMF_{Comb}	C_r	$N_{estimados}$
Total (FI+PDO)	0.48	0.41	1	0.48	1.51	1	0.725
Accidentes mortales y con lesiones (FI)			0.321	0.154	1.51	1	0.233
Sólo daños materiales (PDO)			0.679	0.326	1.51	1	0.492

3.3.2 Aplicación del método predictivo en las intersecciones de la carretera:

Para organizar mejor el trabajo se agruparon los datos principales según las condiciones base de las intersecciones en una sola tabla y luego se aplicó los pasos dentro de esta etapa para cada intersección de forma independiente. Las características geométricas y de control para ambos intersecciones se han resumido en la tabla 3.24.

Tabla 3.24: Características geométricas y de control de intersecciones.

Características geométricas y de control	Condiciones reales						
	Intersección 1	Intersección 2	Intersección 3	Intersección 4	Intersección 5	Intersección 6	Intersección 7
Ángulo absoluto de intersección	0	50	30	0	20	0	20
Intersección con carriles de giro izquierda	No	Sí	No	No	No	No	No
Intersección con carriles de giro derecha	No	Sí	No	No	No	No	No
Iluminación	Sí	No	No	No	No	No	No
Otros datos requeridos							
$PAVDT_{máx}$ (veh/día)	4 323	4 323	3 975	3 100	3 100	3 100	3 100
$PAVDT_{mín}$ (veh/día)	100	100	100	100	100	100	100

❖ Intersección que da acceso a Reparto Moro

Datos fundamentales de la intersección

- $PAVDT_{m\acute{a}x} = 4\ 232$ veh/día
- $PAVDT_{m\acute{i}n} = 100$ veh/día
- Tipo de intersección=3ST
- Ángulo de intersección=90°

Nota: Por la falta de datos se asumió el PAVDT de 100 veh/día para todas carreteras secundarias.

-Paso 9: Elegir y aplicar el SPF correspondiente

$$N_{spf\ 3ST} = \exp[-9,86 + 0,79 \times \ln(PAVDT_{m\acute{a}x}) + 0,49 \times \ln(PAVDT_{m\acute{i}n})] \quad \text{Ecuación 2.4}$$
$$= \exp[-9,86 + 0,79 \times \ln(4232) + 0,49 \times \ln(100)] = 0,365 \text{ accidentes/año}$$

-Paso 10: Aplicar los AMFs:

El Factor de modificación de accidente por el efecto de inclinación de la intersección en los accidentes totales

$AMF_{1i} = 1,00$; el ángulo de intersección coincide con la condición base (90 grados).

El Factor de modificación de accidente por el efecto de presencia carriles de giro izquierda

$AMF_{2i} = 1,00$; no existe carriles de giro izquierda

El Factor de modificación de accidente por el efecto de presencia de carriles de giro derecha

$AMF_{3i} = 1,00$; no existe carriles de giro derecha

El Factor de modificación de accidente por el efecto de presencia de iluminación

$$AMF_{4i} = 1 - 0,38 \times p_{ni} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

$$p_{ni} = 0,260 \text{ (Tabla 2.11)}$$

$$AMF_{4i} = 1 - 0,38 \times 0,260 = 0,90$$

El resumen de los factores de modificación de accidentes y el factor de modificación de accidentes combinado se muestra en la tabla 3.25.

Tabla 3.25: Factores de modificación de accidentes de la intersección No.1

AMFs para intersecciones de carretera rural de dos carriles				
1	2	3	4	5
AMF_{1i}	AMF_{2i}	AMF_{3i}	AMF_{4i}	AMF_{Comb}
1	1	1	0.9	0.9

-Paso 11: Aplicar el factor de calibración

La frecuencia de accidentes estimados mediante el modelo afectado por el factor de calibración se muestra en la tabla 3.26.

Tabla 3.26: Resultados de accidentes estimados para la intersección No.1

Accidentes para intersecciones (3ST) de carretera rural de dos carriles							
1	2	3	4	5	6	7	8
Nivel de gravedad de accidente	$N_{spf_{3ST}}$	k	Distribución de gravedad	$N_{spf_{3ST}}$ por distribución de gravedad	AMF_{Comb}	C_i	$N_{estimado_{int}}$
Total (FI+PDO)	0.365	0.54	1	0.365	0.9	1	0.329
Accidentes mortales y con lesiones (FI)			0.415	0.151	0.9	1	0.136
Sólo daños materiales (PDO)			0.585	0.214	0.9	1	0.192

❖ Intersección que da acceso a la Combinado Textil Desembarco de Granma

Datos fundamentales de la intersección

- $PAVDT_{m\acute{a}x} = 4\ 323 \text{ veh/día}$
- $PAVDT_{m\acute{i}n} = 100 \text{ veh/día}$
- Tipo de intersección=3ST
- Ángulo de intersección=40°

-Paso 9: Elegir y aplicar el SPF correspondiente

$$N_{spf_{3ST}} = 0,365 \text{ accidentes/año}$$

-Paso 10: Aplicar los AMFs

El Factor de modificación de accidente por el efecto de inclinación de la intersección en los accidentes totales

$$AMF_{1i} = e^{0,004 \times \text{ángulo}} \quad \text{Ecuación 2.15} = e^{0,004 \times 50} = 1,22$$

El Factor de modificación de accidente por el efecto de presencia carriles de giro izquierda

$$AMF_{2i} = 0,56 \text{ (Tabla 2.9)}$$

El Factor de modificación de accidente por el efecto de presencia de carriles de giro derecha

$$AMF_{3i} = 0,74 \text{ (Tabla 2.10)}$$

El Factor de modificación de accidente por el efecto de presencia de iluminación

$AMF_{4i}=1,00$; intersección no iluminada.

El resumen de los factores de modificación de accidentes y el factor de modificación de accidentes combinado se muestra en la tabla 3.27.

Tabla 3.27: Factores de modificación de accidentes de la intersección No.2

AMFs para intersecciones de carretera rural de dos carriles				
1	2	3	4	5
AMF_{1i}	AMF_{2i}	AMF_{3i}	AMF_{4i}	AMF_{Comb}
1.22	0.56	0.74	1	0.51

-Paso 11: Aplicar el factor de calibración

La frecuencia de accidentes estimados mediante el modelo afectado por el factor de calibración se muestra en la tabla 3.28.

Tabla 3.28: Resultados de accidentes estimados para la intersección No.2

Accidentes para intersecciones (3ST) de carretera rural de dos carriles							
1	2	3	4	5	6	7	8
Nivel de gravedad de accidente	$N_{spf\ 3ST}$	k	Distribución de gravedad	$N_{spf\ 3ST}$ por distribución de gravedad	AMF_{Comb}	C_i	$N_{estimado_{int}}$
Total (FI+PDO)	0.365	0.54	1	0.365	0.51	1	0.186
Accidentes mortales y con lesiones (FI)			0.415	0.151	0.51	1	0.077
Sólo daños materiales (PDO)			0.585	0.214	0.51	1	0.109

❖ Intersección que da acceso al Instituto Preuniversitario Vocacional de Ciencias

Datos fundamentales de la intersección

- $PAVDT_{m\acute{a}x}=3\ 975$ veh/día
- $PAVDT_{m\acute{i}n}=100$ veh/día
- Tipo de intersección=4ST
- Ángulo de intersección=60° (ambos carreteras)

-Paso 9: Elegir y aplicar el SPF correspondiente

$$N_{spf\ 4ST} = \exp[-8,56 + 0,60 \times \ln(PAVDT_{m\acute{a}x}) + 0,20 \times \ln(PAVDT_{m\acute{i}n})] \quad \text{Ecuación 2.5}$$

$$= \exp[-9,86 + 0,79 \times \ln(3975) + 0,49 \times \ln(100)] = 0,348 \text{ accidentes / año}$$

-Paso 10: Aplicar los AMFs

El Factor de modificación de accidente por el efecto de inclinación de la intersección en los accidentes totales

$$AMF_{1i} = e^{0,0054 \cdot \text{ángulo}} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

$$AMF_{1i} = e^{0,0054 \cdot 30} = 1,18$$

$$AMF_{2i} = 1,00; AMF_{3i} = 1,00; AMF_{4i} = 1,00$$

El resumen de los factores de modificación de accidentes y el factor de modificación de accidentes combinado se muestra en la tabla 3.29.

Tabla 3.29: Factores de modificación de accidentes de la intersección No.3

AMFs para intersecciones de carretera rural de dos carriles				
1	2	3	4	5
AMF_{1i}	AMF_{2i}	AMF_{3i}	AMF_{4i}	AMF_{Comb}
1.18	1	1	1	1.18

-Paso 11: Aplicar el factor de calibración

La frecuencia de accidentes estimados mediante el modelo afectado por el factor de calibración se muestra en la tabla 3.30.

Tabla 3.30: Resultados de accidentes estimados para la intersección No.3

Accidentes para intersecciones (4ST) de carretera rural de dos carriles							
1	2	3	4	5	6	7	8
Nivel de gravedad de accidente	$N_{spf_{4ST}}$	k	Distribución de gravedad	$N_{spf_{4ST}}$ por distribución de gravedad	AMF_{Comb}	C_i	$N_{estimado_{int}}$
Total (FI+PDO)	0.348	0.24	1	0.348	1.18	1	0.411
Accidentes mortales y con lesiones (FI)			0.34	0.118	1.18	1	0.14
Sólo daños materiales (PDO)			0.66	0.23	1.18	1	0.271

❖ Intersección que da acceso al Instituto Politécnico Lázaro Cárdenas del Río

Datos fundamentales de la intersección

- $PAVDT_{m\acute{a}x} = 3\ 100$ veh/día
- $PAVDT_{m\acute{i}n} = 100$ veh/día
- Tipo de intersección=3ST
- Ángulo de intersección=90°

-Paso 9: Elegir y aplicar el SPF correspondiente

$$N_{spf_{3ST}} = 0,286 \text{ accidentes/año}$$

-Paso 10: Aplicar los AMFs

Todas condiciones reales coinciden con las de base por tanto:

$$AMF_{1i} = 1,00; AMF_{2i} = 1,00; AMF_{3i} = 1,00; AMF_{4i} = 1,00$$

El resumen de los factores de modificación de accidentes y el factor de modificación de accidentes combinado se muestra en la tabla 3.31.

Tabla 3.31: Factores de modificación de accidentes de la intersección No.4

AMFs para intersecciones de carretera rural de dos carriles				
1	2	3	4	5
AMF_{1i}	AMF_{2i}	AMF_{3i}	AMF_{4i}	AMF_{Comb}
1	1	1	1	1

-Paso 11: Aplicar el factor de calibración

La frecuencia de accidentes estimados mediante el modelo afectado por el factor de calibración se muestra en la tabla 3.32.

Tabla 3.32: Resultados de accidentes estimados para la intersección No.4

Accidentes para intersecciones (3ST) de carretera rural de dos carriles							
1	2	3	4	5	6	7	8
Nivel de gravedad de accidente	$N_{spf_{3ST}}$	k	Distribución de gravedad	$N_{spf_{3ST}}$ por distribución de gravedad	AMF_{Comb}	C_i	$N_{estimado:int}$
Total (FI+PDO)	0.286	0.54	1	0.286	1	1	0.286
Accidentes mortales y con lesiones (FI)			0.415	0.119	1	1	0.119
Sólo daños materiales (PDO)			0.585	0.167	1	1	0.167

❖ Intersección que da acceso a Reparto Universitario (la primera calle)

Datos fundamentales de la intersección

- $PAVDT_{m\acute{a}x} = 3\ 100\text{veh/día}$
- $PAVDT_{m\acute{i}n} = 100\text{veh/día}$
- Tipo de intersección=3ST
- Ángulo de intersección=70°

-Paso 9: Elegir y aplica el SPF correspondiente

$$N_{spf_{3ST}} = 0,286 \text{ accidentes/año}$$

-Paso 10: Aplicar los AMFs

$$AMF_{1i} = 1,08 ; AMF_{2i} = 1,00 ; AMF_{3i} = 1,00 ; AMF_{4i} = 1,00$$

El resumen de los factores de modificación de accidentes y el factor de modificación de accidentes combinado se muestra en la tabla 3.33.

Tabla 3.33: Factores de modificación de accidentes de la intersección No.5

AMFs para intersecciones de carretera rural de dos carriles				
1	2	3	4	5
AMF_{1i}	AMF_{2i}	AMF_{3i}	AMF_{4i}	AMF_{Comb}
1.08	1	1	1	1.08

-Paso 11: Aplicar el factor de calibración

La frecuencia de accidentes estimados mediante el modelo afectado por el factor de calibración se muestra en la tabla 3.34.

Tabla 3.34: Resultados de accidentes estimados para la intersección No.5

Accidentes para intersecciones (3ST) de carretera rural de dos carriles							
1	2	3	4	5	6	7	8
Nivel de gravedad de accidente	$N_{spf_{3ST}}$	k	Distribución de gravedad	$N_{spf_{3ST}}$ por distribución de gravedad	AMF_{Comb}	C_i	$N_{estimado_{int}}$
Total (F+PDO)	0.286	0.54	1	0.286	1.08	1	0.309
Accidentes mortales y con lesiones (FI)			0.415	0.119	1.08	1	0.128
Sólo daños materiales (PDO)			0.585	0.167	1.08	1	0.181

❖ **Intersección que da acceso a las Antillas y la puerta de la Universidad**

Datos fundamentales de la intersección

- $PAVDT_{m\acute{a}x} = 3\ 100$ veh/día
- $PAVDT_{m\acute{i}n} = 100$ veh/día
- Tipo de intersección=4ST
- Ángulo de intersección=90 grados

-Paso 9: Elegir y aplicar el SPF correspondiente

$$N_{spf_{4ST}} = 0,286 \text{ accidentes/año}$$

-Paso 10: Aplicar los AMFs

Todas condiciones reales coinciden con las de base por tanto:

$$AMF_{1i} = 1,00 ; AMF_{2i} = 1,00 ; AMF_{3i} = 1,00 ; AMF_{4i} = 1,00$$

El resumen de los factores de modificación de accidentes y el factor de modificación de accidentes combinado se muestra en la tabla 3.35.

Tabla 3.35: Factores de modificación de accidentes de la intersección No.6

AMFs para intersecciones de carretera rural de dos carriles				
1	2	3	4	5
AMF_{1i}	AMF_{2i}	AMF_{3i}	AMF_{4i}	AMF_{Comb}
1	1	1	1	1

-Paso 11: Aplicar el factor de calibración

La frecuencia de accidentes estimados mediante el modelo afectado por el factor de calibración se muestra en la tabla 3.36.

Tabla 3.36: Resultados de accidentes estimados para la intersección No.6

Accidentes para intersecciones (4ST) de carretera rural de dos carriles							
1	2	3	4	5	6	7	8
Nivel de gravedad de accidente	$N_{SP\ 4ST}$	k	Distribución de gravedad	$N_{SP\ 4ST}$ por distribución de gravedad	AMF_{Comb}	C_i	$N_{estimado_{int}}$
Total (FI+PDO)	0.286	0.24	1	0.286	1	1	0.286
Accidentes mortales y con lesiones (FI)			0.34	0.097	1	1	0.097
Sólo daños materiales (PDO)			0.66	0.189	1	1	0.189

❖ **Intersección que da acceso a la Facultad de Agropecuaria**

Datos fundamentales de la intersección

- $PAVDT_{m\acute{a}x} = 3\ 100\text{veh/día}$
- $PAVDT_{m\acute{i}n} = 100\text{veh/día}$
- Tipo de intersección=3ST
- Ángulo de intersección=70°

-Paso 9: Elegir y aplicar el SPF correspondiente

$$N_{SP\ 3ST} = 0,286 \text{ accidentes/año}$$

-Paso 10: Aplicar los AMFs

Todas condiciones reales coinciden con las de base por tanto:

-Paso 10: Aplicar los AMFs

$$AMF_{1i} = 1,08 ; AMF_{2i} = 1,00 ; AMF_{3i} = 1,00 ; AMF_{4i} = 1,00$$

El resumen de los factores de modificación de accidentes y el factor de modificación de accidentes combinado se muestra en la tabla 3.37.

Tabla 3.37: Factores de modificación de accidentes de la intersección No.7

AMFs para intersecciones de carretera rural de dos carriles				
1	2	3	4	5
AMF_{1i}	AMF_{2i}	AMF_{3i}	AMF_{4i}	AMF_{Comb}
1.08	1	1	1	1.08

-Paso 11: Aplicar el factor de calibración

La frecuencia de accidentes estimados mediante el modelo afectado por el factor de calibración se muestra en la tabla 3.38.

Tabla 3.38: Resultados de accidentes estimados para la intersección No.7

Accidentes para intersecciones (3ST) de carretera rural de dos carriles							
1	2	3	4	5	6	7	8
Nivel de gravedad de accidente	$N_{sp/3ST}$	k	Distribución de gravedad	$N_{sp/3ST}$ por distribución de gravedad	AMF_{Comb}	C_i	$N_{estimado\ int}$
Total (FI+PDO)	0.286	0.54	1	0.286	1.08	1	0.309
Accidentes mortales y con lesiones (FI)			0.415	0.119	1.08	1	0.128
Sólo daños materiales (PDO)			0.585	0.167	1.08	1	0.181

En esta etapa no se aplicó el paso 12 porque se desea realizar una estimación para un año. Tampoco se aplicó el paso 13 ya que los modelos de reporte de accidentes de tránsito en Cuba no brindan información de asignar los accidentes a los sitios individuales.

-Paso 14: La repetición de los modelos predictivos para los distintos sitios.

-Paso 15: Aplicación del método empírico Bayes a nivel del proyecto junto con el paso 16: sumar todos los sitios y años en el estudio para estimar la frecuencia total de accidentes.

Mediante el programa de Excel se calculó el número de accidentes esperados, combinando los accidentes estimados para la red vial con los accidentes observados. Los resultados de los dos pasos se muestran en la tabla 3.39

Tabla 3.39: Resultados del método empírico Bayes a nivel del proyecto

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Tipo de sitio	Frecuencia media de accidentes estimados (accidentes/año)			Accidentes observados	Parámetro de dispersión	$N_{estimado\ w0}$	$N_{estimado\ w1}$	W_0	N_0	W_1	N_1	$N_{esperado\ combinado}$
	$N_{estimado\ (Total)}$	$N_{estimado\ (FI)}$	$N_{estimado\ (PDO)}$	$N_{observado\ (accidentes/año)}$	k							
Segmentos						Segmentos						
Segmento 1	1.62	0.52	1.1		0.28	0.735	0.673					
Segmento 2	1.04	0.33	0.71		0.4	0.433	0.645					
Segmento 3	1.38	0.44	0.94		0.56	1.066	0.879					
Segmento 4	1.55	0.5	1.05		0.28	0.673	0.659					
Segmento 5	0.63	0.2	0.43		0.74	0.294	0.683					
Segmento 6	0.77	0.25	0.52		0.74	0.439	0.755					
Segmento 7	0.72	0.23	0.49		0.41	0.212	0.543					
Intersecciones						Intersecciones						
intersección 1	0.33	0.14	0.19		0.54	0.059	0.422					
intersección 2	0.19	0.08	0.11		0.54	0.019	0.32					
intersección 3	0.41	0.14	0.27		0.24	0.04	0.314					
intersección 4	0.29	0.12	0.17		0.54	0.045	0.396					
intersección 5	0.31	0.13	0.18		0.54	0.052	0.409					
intersección 6	0.29	0.1	0.19		0.24	0.02	0.264					
intersección 7	0.31	0.13	0.18		0.54	0.052	0.409					
Σ de columna	9.84	3.31	6.53	31		4.139	7.371	0.7	16.1	0.57	18.9	17.5

Explicación de los pasos utilizados para calcular los accidentes esperados mediante el método empírico Bayes:

-Se halló la sumatoria de todos accidentes estimados para la red vial; sumando cantidades estimados de sitios individuales considerando niveles de gravedad de accidentes.

-Se calculó ($N_{estimado\ w0}$) número total de accidentes asumiendo que la frecuencia de accidentes de distintos sitios de la carretera son estadísticamente independientes mediante la ecuación 3.1.

-Se calculó ($N_{estimado_{w1}}$) número total de accidentes asumiendo que la frecuencia de accidentes de distintos sitios de la carretera son perfectamente correlacionados mediante la ecuación 3.2.

-El peso que se coloca a la frecuencia de accidentes estimados (W_0) asumiendo que la frecuencia de accidentes de distintos sitios de la carretera son estadísticamente independientes mediante la ecuación 2.20.

-Número de accidentes esperados (N_0) asumiendo que la frecuencia de accidentes de distintos sitios de la carretera son estadísticamente independientes mediante la ecuación 2.21.

-El peso que se coloca a la frecuencia de accidentes estimados (W_1) asumiendo que la frecuencia de accidentes de distintos sitios de la carretera son perfectamente correlacionados utilizando ecuación 2.22.

-Número de accidentes esperados (N_1) asumiendo que la frecuencia de accidentes de distintos sitios de la carretera son perfectamente correlacionados utilizando ecuación 2.23.

-Por último se calculó la frecuencia media de accidentes esperados para los sitios de la carretera combinados ($N_{esperado/combinado}$) mediante ecuación 2.24.

$$N_{estimado_{w0}} = Columna1 \times (Columna2)^2 \text{ Ecuación 3.1}$$

$$N_{estimado_{w1}} = \sqrt{(Columna1 \times Columna2)} \text{ Ecuación 3.2}$$

$$W_0 = \frac{1}{1 + \frac{N_{estimado_{w0}}}{N_{estimado(Total)}}} \text{ Ecuación 2.20} = \frac{1}{1 + \frac{4,14}{9,84}} = 0,704$$

$$N_0 = W_0 \times N_{estimado(Total)} + (1 - W_0) \times N_{observado(Total)} \text{ Ecuación 2.21}$$

$$= 0,704 \times 9,84 + (1 - 0,704) \times 31 = 16,103$$

$$W_1 = \frac{1}{1 + \frac{N_{estimado_{w1}}}{N_{estimado(Total)}}} \text{ Ecuación 2.22} \quad W_1 = \frac{1}{1 + \frac{7,371}{9,84}} = 0,572$$

$$N_1 = W_1 \times N_{estimado(Total)} + (1 - W_1) \times N_{observado(Total)} \text{ Ecuación 2.23}$$

$$= 0,572 \times 9,84 + (1 - 0,572) \times 31 = 18,896$$

$$N_{esperado/combinado} = \frac{N_0 + N_1}{2} \text{ Ecuación 2.24} = \frac{16,103 + 18,896}{2} = 17,50$$

En la tabla 3.40 se representa el resumen de los resultados de la frecuencia de accidentes estimados y esperados.

Tabla 3.40: Resumen de resultados de cantidad de accidentes estimados y esperados para el tramo Circunvalación - Universidad

1	2	3
Nivel de gravedad de accidente	$N_{estimado}$	$N_{esperado/combinado}$
Total (FI+PDO)	9.84	17.5
Accidentes mortales y con lesiones (FI)	3.31	5.9
Sólo daños materiales (PDO)	6.53	11.6

$N_{estimado}$ = Resultados de las columnas 2,3 y 4 de la tabla 3.53

$$N_{esperado/combinado(FI)} = \frac{Columna3(Total) \times Columna2(FI)}{Columna2(Total)} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

$$N_{esperado/combinado(PDO)} = \frac{Columna3(Total) \times Columna2(PDO)}{Columna2(Total)} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

-Paso 17: No se aplicó porque no existen diseños alternativos, tratamientos o PAVDT previsto para ser evaluados.

3.4. Etapa 3: Evaluación y análisis de los resultados

-Paso 18: Evaluación de resultados

- Entre los 7 segmentos analizados, los 4 primeros resultaron con mayor cantidad total de accidentes estimados. El segmento 1 (Circunvalación hasta el Reparto Moro) es el segmento con mayores accidentes estimados con el valor igual a 1,62 accidentes/año porque además de su PAVDT elevado (4 232veh/día) tiene una longitud mayor después del segmento 4 de 1,33Km. El segmento 4 (entre el acceso al Instituto Preuniversitario Vocacional de Ciencias y el acceso al Instituto Politécnico Lázaro Cárdenas del Río) es que ocupa el segundo lugar con 1,55 accidentes/año, aunque tiene el PAVDT de 3 975veh/día menor que el primero, es el segmento con longitud máxima (1,36Km).
- La intersección de mayores accidentes estimados es la número 3 (una intersección de 4 ramas la cual, la carretera hacia izquierda da acceso al Instituto Preuniversitario

Vocacional de Ciencias) con una estimación de 0,41 accidentes/año. La estimación se ve afectada por el factor de modificación de accidentes vinculado al efecto de inclinación de la intersección en los accidentes totales.

- La frecuencia media de accidentes estimados ($N_{estimada(Total)}$) es de 9,84 accidentes/año; el valor es tres veces menor que la cantidad de accidentes observados (31 accidentes/año).
- La frecuencia media de accidentes esperados para la red vial ($N_{esperado/combinada(Total)}$) es de 17,5 accidentes/año, el valor mejorado mediante la aplicación del método empírico Bayes y es dos veces menor que la cantidad de accidentes observados en el tramo.
- Cuando se aplica el método EB, la cantidad de accidentes esperados se acerca más a la realidad.
- La gran diferencia entre los accidentes esperados y los observados puede ser por el factor de calibración que en este trabajo se utilizó el valor de factor de calibración igual a 1,00 ya que no se pudo calcular el valor real por la falta de datos recomendados para realizar el proceso de calibración.

3.5. Conclusiones parciales

- El método predictivo del manual HSM 2010 se aplicó, satisfactoriamente, a un tramo de carretera rural de dos carriles de Cuba.
- El segmento 1 resultó el sitio más peligroso de los 14 sitios analizados con una cantidad total de accidentes estimados de 1,62 accidentes/año, también coincidió con el sitio de más accidentes mortales y con lesiones (FI) teniendo el valor de 0,52 accidentes/año.
- La cantidad de accidentes total estimados es mucho menor que los accidentes observados en el tramo de estudio.
- La cantidad de accidentes total esperados se acerca más a la realidad, aunque sigue siendo inferior.
- El número de accidentes mortales y con lesiones (FI) estimados es mucho menor que la cantidad observados, y según este la cantidad de accidentes mortales y con lesiones (FI) esperados es mucho menor (alejada de la realidad) ya que está en función de accidentes estimados.
- La diferencia entre los accidentes esperados y los observados puede ser producto de varios factores, los principales son:

- a. Que las tablas consultados en calcular los factores de modificación de accidentes fueron desarrollados para condiciones del sistema de carreteras de los Estados Unidos que pueden ser totalmente distintos a las de Cuba.
- b.** Que no se pudo calibrar los modelos predictivos por la falta de información necesario para el proceso de calibración.

CONCLUSIONES

- Los accidentes de tránsito son una de las primeras causas de muertes e incapacidades de la población, específicamente de los jóvenes y de adultos de nivel productivo implicando el impacto negativo en el desarrollo del mundo y el aumento de costo socioeconómico.
- Programas de seguridad vial han concentrado sus esfuerzos en mejorar la seguridad vial para poder disminuir a una cantidad mínima posible de los accidentes vehiculares y sus consecuencias. Estudios realizados acerca de causas principales de accidentes de tránsito han demostrado que el factor humano (específicamente el conductor) es que contribuye más en la ocurrencia de accidentes.
- Uno de los métodos desarrollados para evaluar la seguridad es el HSM 2010, el cual presenta herramientas de análisis basadas en una compilación de los mejores y más recientes estudios que establecen relaciones entre variables de infraestructura y la ocurrencia de accidentes. También presenta modelos de predicción para estimar la frecuencia y gravedad de accidentes apoyando la toma de decisiones de proyectos viales.
- El manual HSM 2010 proporciona métodos predictivos para carreteras rurales de dos carriles, rurales multicarril y en arteriales urbanas y suburbanas. Se aplicó el método predictivo en una carretera rural de dos carriles de provincia Villa Clara, obteniendo los siguientes resultados:
 - a) El segmento 1 (entre la Circunvalación hasta el acceso de Reparto Moro) del tramo analizado resultó el sitio más peligroso con un total de accidentes estimados de 1,62 accidentes/año.
 - b) La intersección con el máximo número de accidentes estimados es la intersección 3 (una intersección de 4 ramas la cual, la carretera hacia izquierda da acceso al Instituto Preuniversitario Vocacional de Ciencias) con un total de accidentes estimados de 0,41 accidentes/año.
 - c) Los accidentes esperados son menores que la cantidad de accidentes observados en el tramo que puede ser resultado de que todos los datos de las tablas utilizadas para calcular los factores de modificación de accidentes provienen de los Estados Unidos y que no se pudo calibrar los modelos predictivos.

RECOMENDACIONES

- Necesidad de calibrar el método predictivo del manual HSM 2010 con el objetivo de adecuarlo a las condiciones del territorio nacional con la accidentalidad real.
- Presentar el procedimiento aplicado a los organismos vinculados con la seguridad vial del territorio.
- Aplicar el procedimiento HSM 2010 a diferentes tramos del territorio para comparar los resultados con los obtenidos en el presente trabajo investigativo.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Informe sobre la situación de la seguridad vial en la región de las Américas. Washington, D.C : OPS, 2015.
- Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial 2013, Apoyo al Decenio de Acción.
- Ley número 109, Código de seguridad vial, Gaceta oficial de la República de Cuba, No. 40: 49. Ciudad de La Habana: Asamblea Nacional del Poder Popular, 2010.
- AASHTO 1994. *A policy on geometric design of highways and streets*, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington D.C.
- AASHTO 2010. *Highway Safety Manual (HSM)*, WASHINGTON D.C., EEUU, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ANIBAL, A. & YASMANY, G. 2012. Calibración del módulo de accidentes Highway Safety Manual (HSM). Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña y Universidad Nacional de San Juan.
- ARMENTEROS, R. R. G. 2010. *Caracterización de la accidentalidad en la provincia de Villa Clara y propuesta de modelo de comportamiento de la Seguridad Vial*. TRABAJO DE DIPLOMA, UNIVERSIDAD MARTA ABREU DE LAS VILLAS, Cuba.
- BARBOSA, V. M. 2015. *Manual de seguridad vial laboral: En control de tu seguridad*. Ensayo de grado para obtener el título de Administradora de Empresas, Universidad Militar Nueva Granada.
- BERARDO, M. G. 2015. Aplicación del modelo de predicción de accidentes viales del HSM (2010) en camino rural de dos carriles en Brasil. In: CÓRDOBA, U. N. D. (ed.) *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*.
- CAL, R., R., M. & G., J. C. 2010. *Ingeniería de Tránsito; Fundamentos y aplicaciones*.
- CLARO, A. D. R. 2015. *Elaboración de una guía de inspección de Seguridad Vial para vías rurales en Villa Clara*. Trabajo de Diploma, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- CRESPO, L. A. P. 2014. *Análisis de los accidentes de tránsito en la ciudad de Cuenca para los años 2010 - 2011 - 2012*. Proyecto de graduación previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, Universidad De Cuenca.
- DEPESTRE, M. I. R. A. G. 2012. *Procedimiento para la valoración de la seguridad vial en carreteras rurales de interés nacional*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- DEPESTRE, M. R. A. G., MARTÍNEZ, D. D. E. D. & GARCÍA, D. E. E. D. 2009. Análisis de la seguridad vial en la región central de Cuba. 9.

- DOMÍNGUEZ, Y. E. 2015. *Características de diseño, superficiales y de operación de un tramo de carretera con problemas en la seguridad vial*. Trabajo de Diploma, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- GUTIERREZ, E. A. P. & RAMOS, J. M. L. 2014. *Evaluación de puntos críticos de accidentalidad vial en la ciudad de Sincelejo*. Documento final de trabajo de grado como requisito para aspirar al título de ingeniero civil, Universidad de Cartagena.
- MATAMOROS, D. X. R. 2015. *Integración de un programa de seguridad vial al modelo Ecuador*. Trabajo de Titulación presentado como requisito para la obtención del título de Máster en Seguridad, Salud y Ambiente, Universidad San Francisco De Quito-Ecuador y Universidad de Huelva-España.
- OLAYA, R. A. 2015. *Modelo espacial de muertes por accidentes de tránsito en la zona urbana de Cali, Colombia durante el periodo 2004-2014*. Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar al título de Magister en Tecnologías de la Información Geográfica, Universidad de Manizales.
- OLMEDO, D. R. B. & SEGISMUNDO, I. A. M. 1986. *Diseño Geométrico de Carreteras*.
- RAOUL, L. 2009. *Evaluación de la seguridad vial a partir de la consistencia del trazado de la carretera*. Trabajo de Diploma, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.
- SIERRA, F. J., BERARDO, M. G., FISSORE, A. D. & OUTES, L. R. 2010. Medición de los niveles de seguridad e inseguridad vial. *II Congreso Ibero-Americano de seguridad vial*, 40.
- VALDIVIEZO, M. N. G. 2014. *Análisis de seguridad vial de las zonas pobladas de cuatro tramos de la carretera lirsra Norte*. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, Universidad de Piura, Perú.

BIBLIOGRAFÍA

- A., G. C., O., N. V. & G., M. V. 2009. Seguridad vial, un desafío de salud pública en la Colombia del siglo XXI. 8.
- BROCKENBROUGH, R. L. & KENNETH J. BOEDECKER, J. 2004. *Highway Engineering Handbook, Second Edition*.
- DEPESTRE, I. R. A. G. & MARTÍNEZ, D. D. E. D. 2012. Estudio integral de la seguridad vial en carreteras rurales de dos carriles. 20.
- DEPESTRE, R. A. G., MARTÍNEZ, D. E. D. & GARCÍA, E. E. D. 2012a. Seguridad vial en carreteras rurales de dos carriles. Provincia de Villa Clara, Cuba. 12.
- DEPESTRE, R. A. G., MARTÍNEZ, D. E. D., GARCÍA, E. E. D. & ARMENTEROS, R. R. G. 2012b. Caracterización de la accidentalidad vehicular y análisis de las causas en la provincia de Villa Clara, Cuba. *Dyna, Universidad Nacional de Colombia, Colombia*.
- DIXON, K., MONSERE, C., XIE, F. & GLADHILL, K. 2012. Calibrating the future highway safety manual predictive methods for Oregon State Highways. Oregon State University & Portland State University.
- Dirección Provincial De Tránsito (DPT). 2015. Cierre de la accidentalidad general de la provincia de Villa Clara. Informe de la Dirección Provincial de Tránsito a la Comisión Provincial de seguridad vial.
- Federal Highway Administration (FHWA). 2004. *IHSDM Design Consistency Module. Engineer's Manual*, FHWA, Washington, D.C., EE. UU.
- GOOGLE. 2016. *Google Earth 2016*.
<https://www.google.com/cu/maps/search/google+earth,cuba> [Online]. [Accessed 20/4/2016 2016].
- NC 853, 2012: Carreteras rurales - Categorización técnica y características geométricas del trazado directo. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba.
- OSPINA, I. N. C. 2014. *Estudio de seguridad vial para determinar la incidencia del diseño geométrico en la accidentalidad carretera Bogotá-Villavicencio a partir de la salida del túnel de Boquerón a puente Quetame*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte., Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- PIARC 2007. *Manual de inspecciones de seguridad vial*.

- PIARC 2009. Catalogue of design safety problems and potential countermeasures. World Road Association, Technical Committee on Road Safety.
- PLANZER, R. 2005. La seguridad vial en la región de América Latina Y el Caribe. situación actual y desafíos. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, CEPAL.
- POSADA-HENAO, J. J., CADAVID-AGUDELO, S. & GÓMEZ, L. C. 2014. Consistencia en el diseño: predicción de la velocidad de operación en carreteras. Vol.10, N.º 17, Pp. 39-47, En.-Dic., 2014. Doi: <http://dx.doi.org/10.16925/in.v9i17.803>, 9.
- SAGÁSTEGUI, F. 2010. Supervisando la seguridad vial en el Perú. *Rev Peru Med Exp Salud Publica*.
- SILVA, K. C. R. 2011. *Aplicação do modelo de previsão de acidentes do HSM em rodovias de pista simples do estado de São Paulo*. Dissertação apresentada á Escola de Engenharia de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Universidade de São Paulo.
- Z., G. T. & H., M. G. 2005. Estudio de aplicación del programa IHSDM, para la verificación de la consistencia en el diseño geométrico de un camino de bajo volumen de tránsito (BVT). 12.