

Aplicación del modelo de predicción de accidentes viales del HSM (2010) en camino rural de dos carriles en Brasil

María Graciela Berardo

Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Fecha de recepción del manuscrito: 19/05/2015

Fecha de aceptación del manuscrito: 14/07/2015

Fecha de publicación: 15/09/2015

Resumen— 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 que 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. Todas las estadísticas empleadas para desarrollar los modelos para predecir accidentes, ya sea en rutas rurales de dos carriles, rurales multicarril como en arteriales urbanas y suburbanas, provienen principalmente de los Estados Unidos y en menor proporción de Noruega y Suiza, cuyas condiciones locales y geográficas son muy diferentes a las de Brasil. Para mejorar la precisión de los modelos de predicción de accidentes es necesario ajustarlos a las condiciones locales. El presente documento muestra un procedimiento para calibrar el modelo de predicción de accidentes del HSM (2010) para vías rurales de dos carriles, utilizando datos estadísticos de accidentes registrados durante los años 2009, 2010 y 2011, en un tramo de la Ruta BR-393, en el estado de Rio de Janeiro, Brasil. Se utilizaron una variedad de técnicas de procesamiento de datos para conseguir los datos geométricos y los accidentes fueron tomados de la página web del Departamento Nacional de Infraestructura de Transportes de Brasil. Se obtuvo un factor de calibración $Cr = 1,50$, que fue comparado con los de estudios anteriores de calibración de modelos de predicción de accidentes. El uso de estos modelos crea un procedimiento prometedor para las evaluaciones cuantitativas de la efectividad de medidas de seguridad; es esperable que el procedimiento utilizado sea empleado en el futuro con datos de otros lugares en iguales tipologías, para extender su aplicación.

Palabras clave—Seguridad Vial, Accidentes, Modelos de Predicción

Abstract— In 2010, the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) launched the first edition of the Road Safety Manual (HSM: Highway Safety Manual), introducing analysis tools based on a compilation of the best and more recent studies that established the relationships between infrastructure variables and road accidents. All the statistics used to develop models to predict accidents, whether on two-lane rural roads, multilane rural and urban and suburban arterial, came mainly from the United States and to a lesser extent Norway and Switzerland, with very different local and geographical conditions than Brazil. To improve the accuracy of prediction models accident is necessary to adjust to local conditions. This paper introduces a method to adjust the HSM (2010) Accidents prediction model for two-lane rural roads using statistical data of accidents registered during the years 2009, 2010 and 2011, on a stretch of BR-393 Road, in the state of Rio de Janeiro, Brazil. A variety of data processing techniques were used to get the geometric data and accidents were taken from the website of the National Department of Transport Infrastructure of Brazil. A calibration factor $Cr = 1,50$ was obtained, that was compared with those of previous studies calibration accident prediction models. Using these models creates a promising method for quantitative evaluation of the effectiveness of security measures; it is expected that the procedure is used in the future with data from other places in the same types, to extend its application.

Keywords— Road Safety, Accidents, Predictive Models

INTRODUCCIÓN

La infraestructura juega un papel fundamental en la seguridad vial puesto que el buen diseño de las vías es

crucial para que los usuarios las utilicen correctamente y en forma segura.

Si bien los usos y costumbres postulan que si se respetan las normas de diseño geométrico, los proyectos resultan seguros, la sola aplicación de las normas no produce caminos seguros (Hauer, 2001) (1).

El análisis de la seguridad sustantiva, aquella definida por la frecuencia y gravedad de los accidente esperados, es la que nos va a indicar el nivel de seguridad de una determinada vía.

Dirección de contacto:

María Graciela Berardo, Corro 142 6°Piso Depto. "A", 5000 Córdoba, Tel. (0351) 6443640, teteberardo@gmail.com

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) (2) 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.

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) (3).

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 (CMFi) 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, cuyas condiciones locales y geográficas son muy diferentes a las de Brasil.

El presente trabajo muestra un procedimiento para calibrar el módulo de predicción de accidentes (frecuencia y gravedad) del HSM en una ruta rural de dos carriles indivisos, por ser las que producen la mayor cantidad y severidad de accidentes en la red vial mundial (Lamm et al., 2007) (4).

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Martinelli et al., 2009 (5) calibraron el modelo de predicción de accidentes del HSM para la Provenza italiana de Arezzo utilizando 1300 Km de rutas de dos trochas indivisas y datos de accidentes de 3 años (2002-2004). Después de varias revisiones, la muestra se redujo a 938 Km. dividida en 8379 secciones y 402 accidentes con un promedio de 0,05 accidentes por sección. Esto llevó a obtener un factor de calibración bajo de 0,17. Los investigadores desarrollaron tres comparaciones para evaluar la calibración, entre el modelo base y el modelo completo, con parámetros promedio y parámetros por sección y utilizando diferentes métodos de cálculo de coeficientes, tales como número de accidentes, densidad o promedios ponderados. Los autores concluyeron que es absolutamente necesaria la calibración del modelo para evitar el exceso de predicción en el modelo base. Los resultados mostraron que los modelos sobreestimaban los accidentes en sitios con pocos accidentes y subestimaron los accidentes en sitios con alta accidentalidad. Señalaron que existe un problema primario con la calibración por la alta segmentación de los procedimientos del HSM que conduce a segmentos con pocos o ningún accidentes, los que no son predichos con exactitud por el HSM. También encontraron que la aplicación de una media ponderada de los accidentes sobre la longitud de un segmento funcionó mejor que la utilización de relación de densidades o accidentes en términos absolutos.

Xie et al., 2011 (6) aplicaron la metodología del HSM a segmentos de caminos en Oregón, sobre 75 sitios con 394 accidentes registrados entre los años 2004 y 2006. El factor

de calibración resultante para Oregón, en caminos de dos trochas indivisas fue de 0,74, utilizando la distribución de accidentes del HSM por defecto. Los investigadores sostenían que los valores por defecto podían alterar el nivel de precisión, por lo que desarrollaron distribuciones de accidentes específicas de cada jurisdicción para reemplazar los valores predeterminados proporcionados por el HSM. Su análisis mostró que, a nivel agregado, el uso de distribuciones específicas por jurisdicción no afectó significativamente los resultados en comparación con el uso de los valores por defecto de HSM. No obstante, ajustando la calibración con la distribución de los accidentes en Oregón, el valor del factor de calibración creció de 0,74 a 1,15. Los autores presentaron una metodología para los sitios que no cumplían las 100 colisiones recomendadas por año entre los 30 a 50 localidades. Para superar el problema de sitios subrepresentados, los autores aplicaron procedimientos de estimación del tamaño de la muestra basados en el promedio del historial de accidentes en Oregón para ese tipo de sitios.

Sun et al., 2013 (7) en su trabajo describen los retos, soluciones prácticas y el resultado de una calibración del HSM en todo el estado de Missouri. Los modelos calibrados incluyeron 8 segmentos de caminos rurales de dos trochas indivisas, 8 intersecciones, y 3 segmentos de autopistas. La técnica de muestreo aleatorio aplicada aseguraba la representatividad geográfica de todo el estado. Los resultados de la calibración indicaron que el HSM predijo los accidentes en Missouri razonablemente bien, con excepción de pocos sitios para los cuales los autores consideran deseable que Missouri desarrolle su propio SPF. El factor de calibración obtenido para el estado de Missouri, sobre 196 sitios y 302 accidentes observados fue igual a 0,82.

Williamson and Zhou, 2012 (8) calibraron el modelo de predicción de accidentes del HSM para caminos rurales de dos trochas indivisas en Illinois. Seleccionaron aleatoriamente cinco segmentos de seis condados, con datos de 165 accidentes en tres años (2005-2007). Utilizaron dos SPFs: El SPF del HSM y un SPF desarrollado específicamente para Illinois. Con el SPF del HSM se predijeron 22,1 accidentes totales mientras que con el SPF local 19,6 accidentes. De este modo, los factores de calibración obtenidos fueron 1,40 y 1,58 respectivamente. El estudio mostró que el número de accidentes en caminos de dos trochas indivisas en Illinois era más alto que el promedio nacional. Los investigadores realizaron un proceso de validación usando diez segmentos aleatoriamente seleccionados en condados con condiciones similares. Se aplicaron ambos métodos y los resultados mostraron un 53 % y 59 % de correlación entre los accidentes observados y predichos respectivamente, confirmando que los resultados de factores de calibración eran razonables.

Howard Lubliner, 2011 (9), evaluó el modelo de predicción de accidentes del HSM para Kansas. El cálculo para determinar el número necesario de secciones se basó en dos desviaciones standard de la media para producir 100 accidentes por año. Asumió una distribución normal de accidentes por sección de diez millas, y estimó necesarias 19 secciones de diez millas para recolectar datos. Verificó que los 19 segmentos sumaran 437 accidentes observados

en un período de 3 años (146 accidentes por año), cumpliendo el criterio mínimo de número de accidentes. Los resultados mostraron que para secciones con valores de la relación entre accidentes observados y predichos superior a 1, el modelo subestimó el número de accidentes. Inversamente, en secciones con relación menor que 1, sobreestimó el número de accidentes. El promedio de los factores de calibración por secciones fue de 1,47; la desviación standard fue de 0,68. El autor agrupó las secciones por distritos obteniendo un factor de calibración de 1,48. Agrupando los distritos adyacentes con similar relación entre accidentes observados y predichos, obtuvo un factor de calibración promedio de 1,47 con desviación standard de 0,63. Debido a que las desviaciones estándar de los coeficientes calculados para las secciones de calibración individuales resultaron tan altas, los autores dudan de la exactitud del modelo al utilizar solamente un único factor de calibración en todo el estado. Un hallazgo adicional de este trabajo fue el peso de los accidentes con animales en caminos rurales de dos trochas indivisas en Kansas, dada la diferencia entre el porcentaje de accidentes con animales en caminos de Kansas (58,9 %) y este tipo de accidentes en la distribución por defecto del HSM (12,1%).

Berardo et al., 2013 (10) aplicaron el módulo de accidentes del HSM a un tramo de 15 Km de una ruta rural de dos carriles indivisos de la provincia de Córdoba, en Argentina. Para obtener el factor de calibración, utilizaron cuatro metodologías diferentes: 1) Dividiendo el tramo en segmentos de igual longitud, 2) Considerando los segmentos rectos y los segmentos con curva por separado, tomando el promedio de los valores de datos geométricos de los segmentos de 1 Km para cada nuevo segmento, 3) Considerando los segmentos rectos por un lado y los segmentos con curvas consecutivas por otro, tomando en los segmentos con curvas el valor promedio del radio y longitud de la curva, pendiente y el valor máximo de las variaciones de peralte, y 4) Analizando el tramo completo, como un único segmento. Los autores concluyeron que las cuatro metodologías empleadas para calibrar el modelo de predicción de accidentes mostraron resultados diferentes.

En cuanto al Modo 1, concluyeron que dio resultados bastante consistentes, aunque destacaron la gran dificultad para conseguir la cantidad de datos necesarios, tanto de accidentes como de geometría de la vía, detallados por kilómetro (o milla). El análisis efectuado discriminando los segmentos rectos por un lado y los segmentos con curvas consecutivas por otro (Modo 3) arrojó los valores más consistentes. En el análisis del tramo completo (Modo 4), los resultados fueron mucho menos consistentes, probablemente por la propia forma de análisis, en donde los datos se determinaron como promedio de los usados en la segmentación por kilómetro. Del análisis de los 4 modos utilizados, concluyeron que el factor de calibración para el tramo estudiado era del orden de 0,85.

También resulta de interés identificar los elementos de diseño críticos para el resultado de un modelo de predicción de accidentes, a fin de determinar qué elementos tendrán el menor efecto si permanecen como configuración predeterminada. Un estudio realizado por Nowakowska, 2010 (11) desarrolló modelos logísticos para la gravedad de los accidentes basados en elementos de diseño de caminos

rurales en Polonia. Este estudio encontró que la presencia y tipo de banquina, tipo de zona, presencia de vereda e interferencias tuvieron influencia estadísticamente significativa en la gravedad del accidente.

MODELO PREDICTIVO DE ACCIDENTES DEL HSM 2010

La estimación de accidentes propuesta por el HSM consta de algoritmos que predicen la frecuencia promedio y distribución de accidentes en caminos rurales de dos carriles, rurales multicarril y en arteriales urbanas y suburbanas.

Dicha estimación puede ser realizada para condiciones existentes (tal el caso analizado en el presente trabajo), nuevas alternativas o nuevos diseños de la vía. Esto permite que el método pueda ser utilizado como herramienta para la evaluación y comparación de la frecuencia promedio esperada de accidentes en diversas situaciones, tales como el impacto en la seguridad de elementos de infraestructura dados los volúmenes de tránsito pasados o futuros, o diseños de infraestructura alternativos, o la efectividad estimada de la aplicación de contramedidas, entre otros.

El método se aplica para un período de tiempo y volumen del tránsito determinados y para ciertas características geométricas del camino (que deben permanecer sin cambios durante el período de análisis).

El HSM realiza una distinción entre segmentos de camino e intersecciones, para lo cual presenta modelos predictivos separados, pero la fórmula genérica del modelo predictivo para ambos casos consta de tres elementos: a) *Función de Performance de Seguridad* (N_{spf} , donde "spf" proviene del inglés *Safety Performance Function*)¹, b) Factores de Modificación de Accidentes (CMF_{ix}) y c) Factor de calibración (C_x).

Esta fórmula genérica se expresa de la siguiente manera:

$$N_{predicted} = N_{spf\ x} \cdot (CMF_{1x} \cdot CMF_{2x} \cdot CMF_{3x} \dots CMF_{yx}) \cdot C_x \quad (1)$$

donde:

$N_{predicted}$:	predicción de frecuencia de accidentes para un sitio tipo "x" en un año específico (accidentes/año)
$N_{spf\ x}$:	predicción de frecuencia promedio de accidentes para condiciones "base" de un sitio tipo "x" ¹
$CMF_{1x} \dots CMF_{yx}$:	factores de modificación de accidentes específicos para sitios tipo "x"
C_x :	factor de calibración de ajuste a condiciones locales para sitios tipo "x"

¹ La estimación de las SPF proviene de modelos de regresión múltiple realizados en base a datos de accidentes observados durante un periodo de años determinado en sitios similares cubriendo un amplio rango de TMDA.

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. Para un camino rural de dos carriles indivisos por ejemplo, algunas de las condiciones “base” son un ancho de carril de 3,65 m, un ancho y tipo de banquina de 1,8 m pavimentada, una densidad de accesos de 5 por milla, entre otras. Las intersecciones, así como los segmentos de camino, responden a otras condiciones “base” distintas. Los sitios bajo análisis rara vez presentarán estas condiciones “base”, por ello, mediante los CMF se “ajustan” los modelos predictivos a las condiciones dadas.

Cabe notar que las condiciones “base” no representan de modo alguno las condiciones de la infraestructura “más seguras” o “mejores”. Simplemente responden a las características de sitios similares en base a los cuales se elaboraron los modelos de regresión.

Función de Performance² de Seguridad

Las Funciones de Performance de Seguridad son ecuaciones de regresión que estiman la frecuencia promedio de accidentes para un sitio dado (con ciertas condiciones base) en función del TMDA, y en el caso de los segmentos de camino, también en función de la longitud de los mismos. Estas funciones estiman la frecuencia promedio de accidentes en general, pero el método permite separar por tipo de accidente y nivel de lesión.

El HSM ofrece Funciones de Performance de Seguridad para tres tipos de caminos: rurales de dos carriles, rurales multicarril y arteriales urbanas y suburbanas. Y para ellos, realiza la distinción entre segmentos (divididos o indivisos) e intersecciones (semaforizadas y sin semáforos).

El presente trabajo se enfoca en segmentos de caminos rurales bidireccionales de dos carriles. Para estos, la Función de Performance de Seguridad está dada por la ec. (2) (aplicable para un TMDA entre 0 y 17.800 veh/día):

$$N_{spf rs} = TMDA \cdot L \cdot 365 \cdot 10^{-6} \cdot e^{(-0,312)} \quad (2)$$

donde:

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

TMDA: tránsito medio diario anual (veh/día)

L: longitud del segmento de camino (millas)

Las “condiciones base” para un segmento de camino bidireccional de dos trochas indivisas, se detallan en la Tabla 1.

Factores de Modificación de Accidentes

Los factores de modificación de accidentes (CMF) se utilizan para ajustar la estimación de la frecuencia de accidentes, dada por Función de Performance de Seguridad (ec. 2), a las características individuales del sitio en estudio.

² Performance: Desempeño

TABLA 1. Condiciones base para segmento de camino bidireccional de dos trochas indivisas

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

Ancho de carril	3,65 m
Ancho de banquina	1,80 m
Tipo de banquina	pavimentada
Curvatura horizontal	No
Variación de peralte	<0,01
Pendiente longitudinal	<3%
Densidad de accesos	5/mi
Banda central sonora	No
Carriles de sobrepaso	No
Carriles de giro izquierda bidireccionales	No
Índice de peligrosidad del costado del camino	3
Iluminación	No
Regulación de velocidad automatizada	No

Específicamente, los CMF 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 CMF para las condiciones base de cada Función de Performance de Seguridad tienen un valor de 1. Cuando una o más condiciones del sitio en estudio difieren de las de base, los CMF pueden tomar valores mayores o menores a 1, dependiendo si esa característica particular está asociada a una mayor o menor frecuencia de accidentes.

En el caso de los segmentos de camino bidireccional de dos trochas indivisas, los CMF son los que se detallan a continuación:

Ancho de Carril

La condición de base del ancho de carril para un segmento de carretera de dos trochas indivisas es de 3.65 m. Si el segmento en estudio tiene ese ancho, entonces el CMF es igual a 1, caso contrario, debe ajustarse la Función de Performance de Seguridad obteniendo el valor del CMF en función del TMDA, de Tabla 2:

TABLA 2. Factor de modificación de accidentes por ancho de carril.

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

Ancho de carril	CMF _a		
	TMDA < 400	400 <TMDA<2000	TMDA >2000
≤ 9 pies	1,05	1,05+2,81.10 ⁻⁴ (TMDA-400)	1,5
10 pies	1,02	1,02+1,75.10 ⁻⁴ (TMDA-400)	1,3
11 pies	1,01	1,01+2,5.10 ⁻⁵ (TMDA-400)	1,05
≥12 pies	1	1	1

Los tipos de accidentes más probables de estar influenciados por el ancho de carril son: accidente de un solo vehículo por salida de calzada, frontales, laterales 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 CMF1 se ve afectado por la proporción pra de los tipos de choques relacionados al

ancho de carril (valor por defecto igual a 57,4%) mediante la ec. (3):

$$CMF_1 = (CMF_{ra} - 1) \cdot p_{ra} + 1 \quad (3)$$

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.

Ancho y Tipo de Banquina

Las condiciones de base para la banquina corresponden a un ancho de 6 pies y de tipo asfaltada. El CMF se calcula en función de valores obtenidos de tabla mediante la ec. (4):

$$CMF_2 = (CMF_{wra} \cdot CMF_{tra} - 1) \cdot p_{ra} + 1 \quad (4)$$

Al igual que en el caso del ancho de carril, el valor del p_{ra} es, por defecto, 57,5% y 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 banquina).

El CMF_{wra} corresponde al ancho de banquina 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 una tabla que está en función del TMDA y del ancho real de la banquina en estudio.

TABLA 3. Factor de modificación de accidentes por ancho de banquina. Fuente: Highway Safety Manual 2010. 1st Ed. Vol 2, Cap 10.

Ancho de banquina	CMF _{wra}		
	TMDA < 400	400 < TMDA < 2000	TMDA > 2000
0 pie	1,1	$1.10 + 2.5 \cdot 10^{-4} (TMDA - 400)$	1,5
2 pies	1,07	$1.07 + 1.43 \cdot 10^{-4} (TMDA - 400)$	1,3
4 pies	1,02	$1.02 + 8.125 \cdot 10^{-5} (TMDA - 400)$	1,15
6 pies	1	1.00	1
≥ 8 pies	0,98	$0.98 + 6.875 \cdot 10^{-5} (TMDA - 400)$	0,87

El CMF_{tra} corresponde al factor que corrige por el tipo de banquina. Su valor se obtiene también de una tabla y está dado en función del tipo de banquina del segmento en estudio (grava, pasto, pavimento, o bien compuesta por más de 1 material) y el ancho de la misma.

TABLA 4. Factor de modificación de accidentes por tipo de banquina. Fuente: Highway Safety Manual 2010. 1st Ed. Vol 2, Cap 10.

Tipo de banquina	CMF _{tra}							
	Ancho de banquina (ft)							
	0	1	2	3	4	6	8	
Pavim.	1	1	1	1	1	1	1	
Grava	1	1	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	
Comp.	1	1,01	1,02	1,02	1,03	1,04	1,06	
Pasto	1	1,01	1,03	1,04	1,05	1,08	1,11	

Si el ancho o tipo de banquina de las dos direcciones de circulación del segmento difieren, el CMF_2 se obtiene por separado para cada dirección y luego se los promedia.

Curvatura Horizontal

Cuando el segmento en estudio presenta curvatura horizontal, se debe corregir la función de predicción con el CMF_3 , ya que la condición de base es que el segmento sea recto. Para ello, se debe disponer de datos respecto de la longitud de la curva, el radio y si tiene o no espirales. El cálculo del CMF_3 se realiza mediante la ec. (5):

$$CMF_3 = (1,55 Lc + 80,2/R - 0,012 S) / 1,55 Lc \quad (5)$$

Lc es la longitud de la curva en millas e incluye las espirales si las tuviera, R es el radio de curvatura en pies y 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 Lc y R es 100 pies, por lo cual, si el segmento en cuestión tiene curvas con valores menores, se utilizará el mínimo.

Si en el segmento elegido hay una serie de curvas se calcula un CMF 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.

Peralte

El CMF para el peralte está dado por la diferencia entre el peralte de diseño recomendado en el Libro Verde de AASHTO (12) y el peralte real de la curva. Si el peralte real coincide o es mayor al recomendado por el Libro Verde, entonces el CMF es 1. Si no es el caso, el CMF se calcula mediante las ec. (6):

$$\begin{aligned}
 CMF_4 &= 1,00 & \text{si} & \quad SV < 0,01 \\
 CMF_4 &= 1,00 + 6 (SV - 0,01) & \text{si} & \quad 0,01 \leq SV < 0,02 \\
 CMF_4 &= 1,06 + 3 (SV - 0,02) & \text{si} & \quad SV \geq 0,02
 \end{aligned} \quad (6)$$

La variación del peralte SV (ft/ft) 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 CMF que se obtiene de una tabla en función del tipo de terreno. Los CMF 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 trochas indivisas será positivo en un sentido y negativo en el otro. La condición de base es un terreno más bien llano, por lo cual para pendientes menores o iguales a 3% el CMF es 1. Si la pendiente tiene entre 3% y 6% el CMF es 1,10 y en caso de que sea mayor a 6% el CMF es 1,16.

Densidad de Accesos

La densidad de accesos se tiene en cuenta mediante un CMF 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 TMDA (ec. 7). 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.

$$CMF_6 = \frac{[(0,322 + DD (0,05 - 0,005 \cdot \ln(TMDA)))]}{[(0,322 + 5 (0,05 - 0,005 \cdot \ln(TMDA))]} \quad (7)$$

Banda Sonora Central

La ausencia de banda sonora central es la condición de base para cuyo caso el CMF es 1. Este CMF es válido sólo para el caso de un segmento de dos trochas indivisas cuya única separación de las direcciones de circulación sea la línea central demarcada. El CMF es igual a 0,94 en el caso de que el segmento sí tenga banda sonora central.

Carriles de Sobrepaso

Al igual que en el caso anterior, la ausencia de carril de sobrepaso es la condición de base para la cual el CMF es 1. Si existe un carril de sobrepaso en uno de los sentidos el CMF es igual a 0,75 y si el carril de sobrepaso está en ambos sentidos el CMF 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 CMF se realiza mediante la ec. (8):

$$CMF_9 = 1,0 - (0,7 P_{dwy} \cdot 0,5) \quad (8)$$

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.

Índice de Peligrosidad del Costado del Camino

El índice de peligrosidad se obtiene mediante un análisis cuantitativo del costado del camino, 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 CMF (ec.9):

$$CMF_{10} = e^{(-0,6869 + 0,0668 \cdot RHR)} / e^{(-0,4865)} \quad (9)$$

Iluminación

La ausencia de iluminación en el segmento es la condición de base. El CMF 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.

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 CFM es igual a 0,93.

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 umbrales 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.

El factor de calibración Cr (en este caso, para segmentos de dos carriles indivisos) se obtiene como el cociente entre la sumatoria de la frecuencia de accidentes observada para todos los sitios de la muestra y la sumatoria de la frecuencia de accidentes esperada en los mismos sitios (ec. 10).

$$Cr = \sum N_{obs} / \sum N_{pred} \quad (10)$$

Para el cálculo de la frecuencia de accidentes esperada N_{pred} para cada uno de los sitios en estudio se calculan los CMF correspondientes y se asume un Cr igual a uno.

APLICACIÓN DEL MODELO PREDICTIVO DE ACCIDENTES

Se ha seguido la metodología propuesta por el HSM, en la Parte C, Capítulo 10, Sección 10.4, para caminos de dos trochas indivisas.(9)

Selección de Ruta y Tramo de Análisis

La BR-393, antigua Río de Janeiro-Bahía es una ruta federal diagonal de Brasil. Su punto de partida es en la ciudad Barra Mansa (Río de Janeiro), y el final en Cachoeiro do Itapemirim (Espírito Santo).

Tenía popularmente la denominación de Río-Bahía por ser una de las más antiguas e importantes rutas entre el estado de Río y el Nordeste de Brasil. Tuvo su construcción iniciada y concluida en la década del 50. Posteriormente recibió el nombre del ex gobernador Lúcio Meira.

Su longitud total es de unos 400 km. La actual BR-393 fue realizada por el Plan Nacional de Transporte en 1973.

El tramo de Río de Janeiro de la carretera se divide en dos partes, el primero entre Barra Mansa y Sapucaia y el segundo de San Antonio de Padua a Bom Jesus do Itabapoana, en el límite con Espírito Santo.

El tramo en Espírito Santo va desde Bom Jesus a Cachoeiro do Itapemirim, donde encuentra otras rutas federales que siguen en dirección al Nordeste brasileiro.

La BR 393 atraviesa, entre otras, a las siguientes ciudades: Barra Mansa, Volta Redonda, Barra do Piraí, Vassouras, Paraíba do Sul, Tres Rios, Sapucaia, San Antonio de Padua, Sao José de Ubá, Itaperuna y Bom Jesus do Itabapoana, en el estado de Rio de Janeiro; Além Paraíba, Volta Grande, Estrela Dalva y Pirapetinga, en Mina Gerais; Apiacá, Mimoso do Sul, Muqui y Cachoeiro do Itapemirim, en Espírito Santo.

En marzo del 2008 se entregó en concesión al Grupo español Acciona, el tramo comprendido desde el límite entre los estados de Mina Gerais y Rio de Janeiro, (Km. 101+900) hasta el empalme con la BR 116 (Km. 258), con una duración de contrato de 25 años (hasta marzo de 2033).

En la Fig. 1, se ha señalado el recorrido de la BR 393.

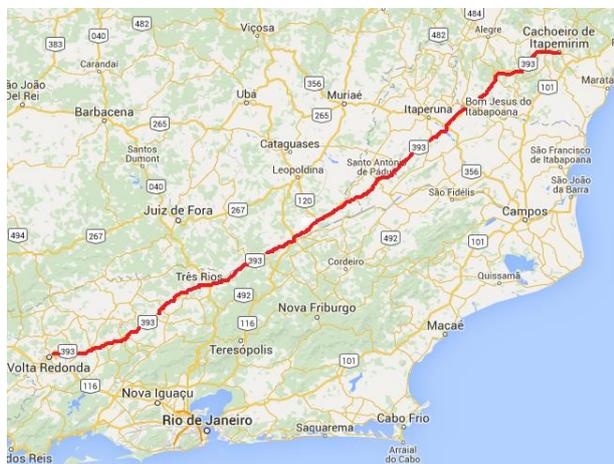


Fig. 1: Recorrido Ruta BR 393.

El tramo de análisis fue seleccionado considerando los siguientes aspectos en conjunto: características topográficas generales, similitud de sección transversal tipo (esta Ruta tiene tramos con calzada duplicada), disponibilidad de datos de tránsito y cantidad (mayor) de accidentes.

De este modo, se decidió trabajar con el tramo comprendido entre el acceso a Tres Ríos (Km. 178,5) y la intersección entre la BR-393 y la BR-492 (Km. 217,5), todo el tramo en el estado de Rio de Janeiro (Fig. 2).



Fig. 2: Ubicación del tramo bajo análisis.

Determinación de características geométricas y de control para los sitios en estudio.

El primer paso consistió en dividir el tramo seleccionado en segmentos homogéneos de 1 km de longitud (0,621 mi). Se eliminaron del análisis dos segmentos con características urbanas, entre las Progr. 178-179 y 182-183.

Datos de Geometría

Los datos geométricos necesarios son: anchos de carril, izquierdo y derecho (en metros), anchos de banquina izquierda y derecha (en metros), curvatura (en Radio de curvatura en metros y Longitud de la curva incluida espiral si hubiere), pendiente longitudinal (en %) y existencia o ausencia de TWLT (carril de giro a izquierda bidireccional).

Obtención de datos

Para obtener los datos requeridos se utilizaron software especializados.

Se construyó una base de información de la ruta en un archivo .dwg. En la misma se incorporaron imágenes satelitales obtenidas del programa Google Earth. Las imágenes se rectificaron a través del programa Global Mapper, utilizando como *proyección UTM*; zona: -23 (48° W – 42° W – Hemisferio Sur); Datum: WGS84. Además, a través de las curvas SRTM, se elaboró el modelo de la superficie de la zona de camino.

A partir de las imágenes se trazó el eje de la ruta, colocando las progresivas correspondientes (Inicio: 178+500) para marcar cada tramo y se dibujaron las curvas horizontales.

A continuación se explica cómo se midieron los diferentes datos de geometría:

- Carril [m]: Se tomaron medidas en cada kilómetro con la herramienta de medición del programa AutoCAD sobre la base de imágenes satelitales compiladas y el eje de la ruta trazado. La exactitud varía en cada tramo según la definición de las imágenes.
- Banquina [m]: Se tomaron medidas del ancho de banquetas en cada kilómetro, con la herramienta de medición del programa AutoCAD sobre la base de imágenes satelitales compiladas. La exactitud varía según la definición de las imágenes. Para conocer si las banquetas son pavimentadas o no, se realizó un recorrido con la herramienta *StreetView* de Google Maps.
- Curvatura [m]: Tanto el radio como la longitud de las curvas se extrajeron del eje trazado sobre el modelo, comprobando con sucesivos círculos en el programa AutoCAD Civil hasta conseguir una coincidencia con las imágenes y luego se midió la longitud. En algunos segmentos, se detectaron más de una curva horizontal, lo que ha quedado registrado en la fila correspondiente.
- Sobre ancho: La existencia de sobreanchos en las curvas se verificó comprobando el aumento o no del ancho de carril en dichos acuerdos con la herramienta de medición del programa AutoCAD en base al modelo generado con el eje de la ruta.
- Pendiente [%]: con la superficie construida a partir de las curvas de nivel SRTM se realizó un perfil longitudinal del eje de la ruta y se midieron las pendientes medias en cada kilómetro. Esta tarea se realizó con el programa AutoCAD Civil.
- Con el eje trazado sobre las imágenes satelitales en el modelo se pudo determinar la existencia o ausencia de carriles de giro a izquierda bidireccionales.

Los datos de diseño geométrico requeridos para la calibración, se resumen en la Tabla 5.

Datos Deseables

Para asegurar un mejor resultado del factor de calibración es deseable poseer información más específica para cada uno de los sitios, tales como: existencia de espirales en las curvas horizontales, variación del peralte (en %) con respecto a lo indicado en normas, densidad de accesos, existencia de franjas sonoras, carriles de adelantamiento, iluminación, sistema automático de control de velocidades e Índices de Peligrosidad.

A continuación se explica cómo se midieron los datos deseables:

- Espirales: Se analizaron las curvas trazadas sobre el eje de la ruta con las imágenes satelitales; se verificaba si el círculo correspondiente al radio era

tangente a las rectas antes y después de las curvas, para determinar la existencia o no de espirales de transición.

- Con respecto a la variación del peralte, se colocaron los peraltes para cada curva en función del radio y de la velocidad del tramo (80 Km/h), utilizando la tabla 3-26 del Manual AASHTO, Ed.2004 (12). Por esta razón, la variación del peralte en todos los casos se asumió nula.
- Accesos [un/km]: A partir del modelo generado que contiene el eje de la ruta con las imágenes satelitales, se realizó el recuento de accesos a la ruta por cada kilómetro medido sobre el trazado del eje.
- Franja sonora: se realizó un recorrido con la herramienta *StreetView* de Google Maps para verificar la existencia de franjas sonoras por cada kilómetro recorrido. En este recorrido además fue importante la visualización de carteles informativos (azules) con el kilometraje dispuestos a los costados del camino.
- Carril de adelantamiento: Con el eje trazado sobre las imágenes satelitales en el modelo se observaron carriles de adelantamiento en algunos tramos. Se verificaron a través de la herramienta *StreetView* de Google Maps, que permite la visualización de la ruta en perspectiva del usuario y en tiempo real. El ancho del carril adicional se midió en el modelo con las imágenes de base y con la herramienta de medición de AutoCAD.
- Iluminación y Sistema de control automático de Velocidad: se realizó un recorrido con la herramienta *StreetView* de Google Maps para verificar la existencia de luminarias al costado del camino y de algún sistema de velocidad automatizado.
- Tasa o Índice de peligrosidad: es un índice utilizado en el HSM que evalúa el diseño de los costados del camino teniendo en cuenta la zona libre de obstáculos, la pendiente del talud (si es recuperable o no), la rugosidad de la superficie, y los obstáculos como árboles, barreras, etc. Este índice de peligrosidad toma valores de 1 a 7, donde el índice 1 corresponde a un entorno indulgente de los costados del camino y un valor 7 representa un entorno que presenta alto riesgo para los usuarios.

Para valorizar la tasa de peligrosidad se utilizó la herramienta *StreetView* de Google Maps en donde se recorrió la ruta entre las progresivas en estudio y observando la proximidad de los obstáculos, las pendientes de taludes entre otras fricciones, se adoptó un índice para cada kilómetro, por comparación con secciones representativas de caminos típicos para los 7 Índices de Peligrosidad, presentados por el HSM, Vol.3, Cap.13.- Se utilizaron como referencias los carteles informativos (azules) con el kilometraje de la ruta ubicados a los costados del camino. En aquellos tramos en los que se han observado características de los costados del camino muy diferentes dentro

del mismo kilómetro, se han incluido dos índices de peligrosidad separados por un guión.

En Anexo, se muestran las secciones representativas de caminos típicos para los 7 Índices de Peligrosidad, del HSM (Vol.3, Cap.13).

En tabla 6 se presentan los datos deseables para los sitios de calibración, que complementan la información de Tabla 5.

TABLA 5. Datos geométricos por km

Tr.	Long (Km)	Long [mi.]	Progresivas			Carril [m]			Banquina		Curvatura				TWLT
			desde	hasta	Izg.	Der.	Izg.	Der.	Izg.	Der.	R [m]	L [m]	Sobranch	Pend [%]	
1	1	0,621	179	180	3,65	7	3	2,5	-	410	500	si	8,00%		
2	1	0,621	180	181	3,65	3,65	3	2,5	-	-	-	si	1,40%		
3	1	0,621	181	182	3,65	3,65	4	2,5	-	225	326	si	3,20%		
										220	305	si	-		
4	1	0,621	183	184	3,65	3,65	3	3	-	1000	120	no	4,00%	Si	
										620	361	si	-		
5	1	0,621	184	185	3,65	3,65	3	3	-	600	382	si	4,20%		
										1400	214	no	-		
6	1	0,621	185	186	3,65	3,65	3	3,5	-	600	226	si	1,70%		
7	1	0,621	186	187	3,65	3,65	3	3,5	-	580	273	si	1,70%		
8	1	0,621	187	188	3,65	3,65	3	2	-	-	-	-	2,40%	Si	
9	1	0,621	188	189	3,65	3,65	2	2	-	1000	216	no	3,50%		
										700	232	si	-		
10	1	0,621	189	190	3,65	3,65	3	3	-	230	210	si	2,00%	Si	
										290	293	si	-		
11	1	0,621	190	191	3,65	3,65	2	2	-	600	255	si	1,40%		
12	1	0,621	191	192	3,65	3,65	2	2	-	650	300	si	1,70%		
13	1	0,621	192	193	3,65	3,65	2	2	-	1500	215	no	0,90%		
14	1	0,621	193	194	3,5	3,5	3	3	-	1200	295	no	1,90%	Si	
15	1	0,621	194	195	3,5	3,5	3	3	PEAJE	-	-	-	1,40%		
16	1	0,621	195	196	3,65	3,65	2	2	-	600	527	si	1,80%		
17	1	0,621	196	197	3,65	3,65	3	4	-	390	475	si	3,90%		
18	1	0,621	197	198	3,65	3,65	2,5	2,5	-	900	178	no	2,60%		
										440	110	si	-		
19	1	0,621	198	199	3,65	3,65	3	3	-	900	225	si	2,20%		
										2400	98	no	-		
20	1	0,621	199	200	3,65	3,65	3	3	-	400	148	Si	4,20%		
21	1	0,621	200	201	3,65	3,65	3	3	-	335	442	Si	2,10%	Si	
22	1	0,621	201	202	3,65	3,65	2,5	2,5	-	175	208	si	1,90%	Si	
										520	215	si	-		
23	1	0,621	202	203	3,65	3,65	3	3	-	4500	237	no	2,40%	Si	
24	1	0,621	203	204	3,65	3,65	2	3	-	650	375	si	2,10%	Si	
25	1	0,621	204	205	3,65	3,65	2	3	-	2500	271	no	2,90%	Si	
										320	247	si	-		
26	1	0,621	205	206	3,65	3,65	2,5	2,5	-	900	245	no	0,90%		
27	1	0,621	206	207	3,65	3,65	3	3	-	-	-	-	0,20%		
28	1	0,621	207	208	3,65	3,65	3	3	-	720	155	si	2,00%		
										1200	136	no	-		
29	1	0,621	208	209	3,65	3,65	3	3	-	330	295	si	2,20%		
										350	270	si	-		
30	1	0,621	209	210	3,65	3,65	3	3	-	550	274	si	2,50%		
										1500	78	no	-		
										3500	160	no	-		
31	1	0,621	210	211	3,65	3,65	2	2	-	400	106	si	2,00%		
										250	84	si	-		
32	1	0,621	211	212	3,65	3,65	2	2	-	2200	254	no	1,50%		
33	1	0,621	212	213	3,65	3,65	3	2	-	3000	522	no	1,50%		
34	1	0,621	213	214	3,65	3,65	3	2	-	650	251	no	2,40%		
35	1	0,621	214	215	3,65	7	3	0,5	-	1500	180	no	3,70%		
36	1	0,621	215	216	3,65	7	3	0,5	-	350	221	si	5,00%		
										260	282	no	-		
37	1	0,621	216	217	3,65	7	3	0	-	230	140	si	4,80%	Si	
										275	108	si	-		
										850	251	no	-		
38	1	0,621	217	218	3,65	7	3	0	-	420	316	si	3,70%	Si	
										900	si	-	-		

Obtención Datos de Tránsito

Una vez definidos los datos requeridos para cada segmento de análisis, se deben agregar los datos de tránsito medio diario anual (TMDA).

Sólo fue posible obtener los datos de TMDA de la Ruta BR-393, para el año 2009, en la página del Departamento Nacional de Infraestructura de Transportes, Diretoria de Infraestructura Rodoviaria, Coordenacao Geral de Operacoes Rodoviaras (13)

Los TMDAs para la aplicación del método predictivo en la BR-393 en el tramo comprendido entre los Km. 179 y 218, para el año 2009, son los que se indican en Tabla 7.

El HSM en el Volumen 2, Cap. 10, punto 10.4, Step 3 establece que: “En muchos casos, los datos de TMDA no estarán disponibles para todos los años del período de evaluación”, y se adjuntan algunas reglas que pueden ser aplicadas en el método predictivo para estimar los TMDAs para los años en los que no se disponga de datos. Entre ellas se menciona: “Los TMDAs para años posteriores al último año para el cual se dispone de datos son asumidos iguales al último año”.

TABLA 6. Datos deseables por km

Tramo	Progresivas		Espirales	Peralte var [%]	Accesos [un/km]	Franja sonora	Carril de Adelant.	Indice Pelig.	Ilumin.	Sist. autom. Veloc.
	desde	hasta								
1	179	180	Si	0	0	No	Der.	4	No	No
2	180	181	-	-	1	No	No	4	No	No
3	181	182	Si	0	1 y 2	No	No	5	No	No
			Si	0						
4	183	184	No	0	5	No	No	3	No	No
			Si	0						
5	184	185	Si	0	2	No	No	4	No	No
			No	0						
6	185	186	Si	0	3	No	No	3	No	No
7	186	187	Si	0	2	No	No	4	No	No
8	187	188	-	-	1	No	No	4	No	No
9	188	189	No	0	4	No	No	3	No	No
			Si	0						
10	189	190	Si	0	2	No	No	3	No	No
			Si	0						
11	190	191	Si	0	0	No	No	3 y 2	No	No
12	191	192	Si	0	0	No	No	2 y 3	No	No
13	192	193	No	0	3	No	No	2	No	No
14	193	194	No	0	3	No	No	2	No	No
15	194	195	-	-	0	No	No	2	No	No
16	195	196	Si	0	0	No	No	2 y 3	No	No
17	196	197	Si	0	0	No	No	4	No	No
18	197	198	No	0	0	No	No	3	No	No
			Si	0						
19	198	199	No	0	1	No	No	4 y 5	No	No
			No	0						
20	199	200	Si	0	1	No	No	5	No	No
21	200	201	Si	0	4	No	No	4	No	No
22	201	202	Si	0	1 y 4	No	No	4	No	No
			Si	0						
23	202	203	No	0	2	No	No	4	Si	No
24	203	204	No	0	0	No	No	3	No	No
25	204	205	No	0	1	No	Ambos	4	No	No
			Si	0						
26	205	206	No	0	2	No	No	2	No	No
27	206	207	-	-	1	No	No	1	No	No
28	207	208	Si	0	1	No	No	2 y 1	No	No
			No	0						
29	208	209	Si	0	0	No	No	3 y 4	No	No
			Si	0						
30	209	210	Si	0	1	No	No	4	No	No
			No	0						
			No	0						
31	210	211	Si	0	3	No	No	3	No	No
			Si	0						
32	211	212	No	0	1	No	No	2 y 3	No	No
33	212	213	No	0	0	No	No	3	No	No
34	213	214	Si	0	1	No	No	3 y 4	No	No
35	214	215	No	0	1	No	Der.	4	No	No
36	215	216	Si	0	0	No	Der.	4	No	No
			Si	0						
37	216	217	Si	0	4	No	Der.	4	No	No
			Si	0						
			Si	0						
38	217	218	Si	0	1	No	Der.	4	Si	No
			Si	0						No

A pesar de las reglas supletorias incorporadas por el HSM, y dado el crecimiento del parque vehicular experimentado, se intentó encontrar una tasa de crecimiento

HSM (2010) EN CAMINO RURAL DE DOS CARRILES EN BRASIL

para utilizar valores cercanos a los reales para los años 2010 y 2011. En Brasil se llevaron a cabo Pesquisas Nacionales de Contagem de Tráfego en los años 1975, 1977, 1989, 1997, 1998, hasta que en el 2002 este Plan fue interrumpido por cuestiones presupuestarias y fue retomado en el 2013 con la contratación de servicios de conteo de tránsito en puntos específicos del sistema de carreteras federales y mediante la cooperación técnica establecida con el Ejército Brasileiro.

En el año 2014 se llevó a cabo el Primer Seminario del PNCT 2011 (Plano Nacional de Contagem de Tráfego 2011), organizado por el Departamento Nacional de Infraestructura de Transportes, Ministerio de Transportes. En este Seminario se presentaron varias ponencias, entre las que se extrajo la de Marcelo Sampaio Cunha Filho, de la Secretaria de Política Nacional de Transportes Departamento de Informações em Transportes, desarrollando una Metodología aplicada en la Pesquisa Nacional de Tráfego 2011 (14).

En dicha exposición, se presenta una lámina con las Tasas de Crecimiento de Vehículos, desde el año 2002 hasta el año 2011, concluyendo que a partir del 2005, se registra una tasa media de crecimiento del parque vehicular de 10 % anual.

Por esta razón, se decidió adoptar los valores de TMDA para los años 2010 y 2011, a partir de los del año 2009 con una tasa de crecimiento anual del 10 %, a partir de la fórmula de interés compuesto $T_{fut} = T_o (1 + i)^n$, obteniéndose los valores que se indican en la Tabla 8.

32	211	212	7880
33	212	213	7880
34	213	214	7880
35	214	215	7880
36	215	216	7880
37	216	217	7880
38	217	218	7880

TABLA 8. TMDA para BR 393 por Km, Años 2009, 2010 y 2011.

Tramo	TMDA 2009	TMDA 2010	TMDA 2011
1	9750	10725	11798
2	9750	10725	11798
3	9750	10725	11798
4	8050	8855	9740
5	8050	8855	9740
6	8050	8855	9740
7	8050	8855	9740
8	8050	8855	9740
9	8050	8855	9740
10	8050	8855	9740
11	8050	8855	9740
12	8050	8855	9740
13	8050	8855	9740
14	8050	8855	9740
15	8050	8855	9740
16	8050	8855	9740
17	8050	8855	9740
18	8050	8855	9740
19	8050	8855	9740
20	8050	8855	9740
21	8050	8855	9740
22	8050	8855	9740
23	8050	8855	9740
24	8050	8855	9740
25	7880	8668	9535
26	7880	8668	9535
27	7880	8668	9535
28	7880	8668	9535
29	7880	8668	9535
30	7880	8668	9535
31	7880	8668	9535
32	7880	8668	9535
33	7880	8668	9535
34	7880	8668	9535
35	7880	8668	9535
36	7880	8668	9535
37	7880	8668	9535
38	7880	8668	9535

TABLA 7. TMDA para BR 393 por Km, Año 2009.

Tramo	Desde	Hasta	TMDA 2009
1	179	180	9750
2	180	181	9750
3	181	182	9750
4	183	184	8050
5	184	185	8050
6	185	186	8050
7	186	187	8050
8	187	188	8050
9	188	189	8050
10	189	190	8050
11	190	191	8050
12	191	192	8050
13	192	193	8050
14	193	194	8050
15	194	195	8050
16	195	196	8050
17	196	197	8050
18	197	198	8050
19	198	199	8050
20	199	200	8050
21	200	201	8050
22	201	202	8050
23	202	203	8050
24	203	204	8050
25	204	205	7880
26	205	206	7880
27	206	207	7880
28	207	208	7880
29	208	209	7880
30	209	210	7880
31	210	211	7880

Obtención Datos de Accidentes

Se trabajará con los datos de accidentes de los años 2009, 2010 y 2011, dado que el año 2011 es el último del que se tiene registros en la página del Departamento Nacional de Infraestructura de Transportes (15)

En la Tabla 9 se indica el total de accidentes registrados durante los tres años seleccionados: 2009, 2010, 2011, entre las Progr. 179 y 218 de la Ruta BR-393, obtenidos de la página del Departamento Nacional de Infraestructura de Transportes.

RESULTADOS OBTENIDOS

La Tabla 10 muestra los valores obtenidos de la frecuencia de accidentes esperada (N_p) para los TMDA de los tres años en los que se obtuvieron datos de accidentes, para el tramo analizado. La frecuencia de accidentes esperada para cada año se obtuvo según la ec. (1), esto es $N_p = N_{spf} (CMF_1.CMF_2.CMF_3. CMF_y)$. C_r , asumiendo un C_r igual a 1. En la última columna, se presentan los valores de C_r obtenidos para cada segmento, como cociente entre los accidentes observados y los accidentes estimados.

TABLA 9. Accidentes por km

Tramo	Progresivas		Nº Accidentes Registrados/Año		
	Desde	Hasta	2009	2010	2011
1	179	180	2	2	4
2	180	181	3	0	1
3	181	182	9	6	2
4	183	184	6	2	1
5	184	185	4	1	2
6	185	186	0	2	1
7	186	187	2	3	4
8	187	188	2	2	6
9	188	189	0	0	0
10	189	190	1	0	4
11	190	191	1	2	0
12	191	192	2	3	0
13	192	193	0	0	2
14	193	194	0	2	4
15	194	195	4	1	1
16	195	196	9	9	8
17	196	197	1	1	4
18	197	198	1	3	1
19	198	199	7	10	6
20	199	200	4	8	4
21	200	201	2	3	6
22	201	202	5	2	3
23	202	203	1	4	3
24	203	204	0	2	3
25	204	205	1	5	2
26	205	206	4	1	2
27	206	207	3	0	1
28	207	208	0	1	0
29	208	209	1	2	2
30	209	210	0	1	3
31	210	211	1	1	0
32	211	212	1	0	4
33	212	213	1	2	6
34	213	214	0	4	2
35	214	215	0	2	1
36	215	216	3	3	1
37	216	217	4	4	4
38	217	218	3	3	1
			88	97	99

Quedan a disposición las planillas con los valores de CMF utilizados para cada sitio, dando como resultado la Frecuencia de Accidentes Esperada (N_p) en los 3 años analizados, mostrados en Tabla 10.

De la comparación entre la frecuencia de accidentes esperada N_p y los accidentes observados en los años 2009, 2010 y 2011, se obtiene el factor de calibración C_r . El factor de calibración de accidentes C_r , permite considerar las condiciones locales y/o geográficas de los sitios en estudio, teniendo en cuenta las diferencias en clima, población de conductores, distintos umbrales de registro de accidentes y prácticas de registro de accidentes. Un C_r menor a 1 significa que la cantidad de accidentes observados es menor a la cantidad predicha por la fórmula.

Hay diferentes formas de analizar los resultados:

Si se considera el tramo completo como un único segmento, se obtiene el factor de calibración C_r de la ec.(11):

$$C_r = \frac{\text{Accidentes Observados}}{\text{Accidentes Estimados}} = \frac{284}{190} = 1,49 \quad (11)$$

TABLA 10. Frecuencia de Accidentes Esperada (N_p)

Tramo	Predicción				Accidentes Observados				Cr
	2009	2010	2011	Total	2009	2010	2011	Total	
1	1,432	1,575	1,733	4,741	2	2	4	8	1,69
2	1,602	1,761	1,938	5,301	3	0	1	4	0,75
3	2,492	2,740	3,015	8,247	9	6	2	17	2,06
4	1,547	1,697	1,859	5,103	6	2	1	9	1,76
5	1,572	1,730	1,903	5,206	4	1	2	7	1,34
6	1,400	1,540	1,694	4,633	0	2	1	3	0,65
7	1,474	1,622	1,784	4,879	2	3	4	9	1,84
8	1,375	1,513	1,664	4,552	2	2	6	10	2,20
9	1,655	1,819	1,999	5,473	0	0	0	0	0,00
10	1,683	1,851	2,037	5,571	1	0	4	5	0,90
11	1,492	1,642	1,806	4,940	1	2	0	3	0,61
12	1,455	1,601	1,761	4,817	2	3	0	5	1,04
13	1,348	1,484	1,632	4,464	0	0	2	2	0,45
14	1,247	1,372	1,509	4,127	0	2	4	6	1,45
15	1,190	1,309	1,440	3,940	4	1	1	6	1,52
16	1,412	1,554	1,709	4,675	9	9	8	26	5,56
17	1,615	1,777	1,955	5,348	1	1	4	6	1,12
18	1,589	1,748	1,923	5,259	1	3	1	5	0,95
19	1,578	1,736	1,909	5,223	7	10	6	23	4,40
20	2,091	2,300	2,530	6,921	4	8	4	16	2,31
21	1,485	1,632	1,794	4,911	2	3	6	11	2,24
22	1,813	1,995	2,194	6,001	5	2	3	10	1,67
23	1,247	1,372	1,510	4,129	1	4	3	8	1,94
24	1,420	1,562	1,719	4,701	0	2	3	5	1,06
25	1,010	1,111	1,222	3,343	1	5	2	8	2,39
26	1,262	1,389	1,528	4,179	4	1	2	7	1,68
27	1,059	1,165	1,282	3,506	3	0	1	4	1,14
28	1,304	1,434	1,578	4,316	0	1	0	1	0,23
29	1,580	1,738	1,912	5,230	1	2	2	5	0,96
30	1,460	1,606	1,767	4,833	0	1	3	4	0,83
31	2,316	2,548	2,803	7,668	1	1	0	2	0,26
32	1,367	1,504	1,654	4,525	1	0	4	5	1,11
33	1,279	1,407	1,548	4,235	1	2	6	9	2,13
34	1,489	1,638	1,802	4,929	0	4	2	6	1,22
35	1,324	1,456	1,602	4,382	0	2	1	3	0,68
36	1,557	1,713	1,885	5,155	3	3	1	7	1,36
37	1,887	2,074	2,277	6,239	4	4	4	12	1,92
38	1,355	1,490	1,640	4,485	3	3	1	7	1,56
			190,186					284	56,98

Si el análisis se efectúa tomando los 38 segmentos por separado, el factor de calibración C_r resulta de promediar los C_r para cada segmento (última columna de Tabla 10) (ec.12).

$$C_r = \frac{\sum C_{r_i}}{n} = \frac{56,98}{38} = 1,50 \quad (12)$$

Efectuando el análisis considerando los segmentos rectos por un lado y los segmentos con curvas consecutivas por otro, se obtuvo un factor de calibración de 1,69.

Las tres metodologías utilizadas mostraron factores de calibración no muy diferentes. La mayor diferencia observada (entre 1,69 y 1,49 se debió a la importante participación del CMF en curva.

El factor de calibración obtenido por el método más exigente (1,50) se emplea para aplicar la ec. (1) y obtener la frecuencia esperada de accidentes en rutas de dos carriles indivisos de Río de Janeiro. Ajustando con este coeficiente la ecuación de predicción de accidentes se obtienen estimaciones más acordes a las condiciones locales de las rutas Brasil.

CONCLUSIONES

Para extraer conclusiones, resulta imprescindible tener presente la metodología de trabajo que propone el HSM (2010), la cual 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 sitio en proceso de calibración.

La muestra utilizada para esta calibración fue de 38 sitios, por lo tanto la condición de mínimo número de sitios en la muestra se ha cumplido.

Respecto del número de accidentes observados por año, se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11. Número de Accidentes Observados por año.

Nº Accidentes Registrados/Año		
2009	2010	2011
88	97	99

Del análisis de la Tabla anterior, surge que no se logró cumplir con la condición del número mínimo de accidentes (independiente de la severidad), pues no se contabilizaron 100 accidentes por año como mínimo, pero se estuvo bastante cerca en todos los años.

Con respecto a la longitud mínima recomendada de cada sitio suficiente para representar adecuadamente las condiciones físicas y de seguridad del sitio en el proceso de calibración, se cumplió porque se trabajó con sitios de 1 kilómetro de longitud en todos los casos.

En síntesis, se analizó la incidencia de los factores de modificación de accidentes CMFi en la frecuencia de accidentes, se comparó el factor de calibración Cr obtenido para Río de Janeiro con el de estudios anteriores de calibración de modelos de predicción de accidentes y se efectuaron recomendaciones sobre la metodología de aplicación del modelo de predicción de accidentes a realidad local, a saber:

- No se pudieron extraer conclusiones sobre la incidencia de la cantidad de accidentes observada en el valor de factor de calibración Cr obtenido, pues en todos los años se contó con registro de accidentes semejantes. Es recomendable chequear este factor Cr siguiendo esta metodología sobre otra ruta de dos carriles indivisos de Río de Janeiro, con mayor cantidad de accidentes.
- El factor de calibración obtenido indicaría que la ecuación del HSM subestima la frecuencia de accidentes en esta ruta. Sin embargo, para que esta calibración sea más certera, debiera cumplirse estrictamente la premisa respecto de la cantidad mínima de accidentes observados por año en los sitios de calibración.
- En Tabla 12 se presenta una síntesis de los valores obtenidos para el factor de calibración Cr para Río de Janeiro y en estudios anteriores de calibración de

modelos de predicción de accidentes (citados en punto 1. Revisión Bibliográfica). No se pueden extraer conclusiones dada la diferencia en el tamaño de la muestra de sitios y de cantidad de accidentes.

- El análisis de la participación de cada Factor de Modificación de Accidentes (CMF), deja al descubierto la importante incidencia que tiene este factor por curvatura horizontal (CMF₃). Este factor depende del radio, la longitud de la curva y la existencia o no de espirales. Se advierte que este Factor de Modificación de Accidentes CMF₃ penaliza significativamente la presencia de curvas de radio reducido.

También se comprobó que el Factor de Modificación de Accidentes CMF₃ es mayor en aquellos sitios en los que se relevó la presencia de más de una curva horizontal en el sitio.

Tabla 12. Factores de Calibración en diferentes estudios

	Nº secciones	Cant. Accidentes	Factor Cr
Arezzo (EEUU)	8379	402	0,17
Oregón (EEUU)	75	394	0,74/1,15
Missouri (EEUU)	196	302	0,82
Illinois (EEUU)	5	165	1,40/1,58
Kansas (EEUU)	19	437	1,47/1,48
Córdoba (Arg.)	14	45	0,65/0,85
Río de Janeiro (Brasil)	38	284	1,5/1,69

- No ocurre lo mismo con el Factor de Modificación de Accidentes por pendiente CMF₄, el que no aumenta tanto en aquellos sitios donde el gradiente de la pendiente longitudinal es considerable.
- Similar consideración puede efectuarse para la participación del CMF₆ correspondiente a la densidad de accesos, también con menor incidencia que el factor de modificación de accidentes por curvatura horizontal.
- La calibración se realizó en un tramo de la ruta BR-393 de dos carriles indivisos, con la intención de emplear en el futuro el procedimiento utilizado con datos de otros lugares en iguales tipologías, y de ese modo extender su aplicación. Sin lugar a dudas, el éxito de la replicación de esta investigación a otros lugares, dependerá en gran medida de la existencia de una base de datos con información de accidentes georreferenciados, no siempre disponible.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue elaborado en el marco del Programa de Centros Asociados para el Fortalecimiento de Posgrados Brasil – Argentina (CAFP-BA).-

REFERENCIAS

- Hauer, Ezra, *La Seguridad en las Normas de Trazado*, Universidad de Toronto; versión castellana de Sandro Rocci, publicada en Revista Rutas (España) N° 83 y Revista Carreteras (Asociación Argentina de Carreteras), (2001).
- American Association of State Highway and Transportation Officials, *Highway Safety Manual* 1st Edition, Vol. 1, 2 y 3, AASHTO, Washington, DC, United States (2010).

- [3] FHWA, *Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM)*, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington DC, United States, Version 7.0.1., (2012)
- [4] Lamm R., Anke Beck, T,s Ruscher, T, Mailaender, *How to make two-lane rural roads safer*, Boston, WIT Press, 1st edition, 118 pages. (2007)
- [5] Martinelli, F., F. La Torre, and P. Vadi. *Calibration of the Highway Safety Manual Accident Prediction Model for Italian Secondary Road Network*. Proceedings of the Transportation Research Board 88th Annual Meeting. Transportation Research Board. National Research Council, Washington, D.C., (2009).
- [6] Xie, F., K. Gladhill, K.K. Dixon, and C.M. Monsere. *Calibrating the Highway Safety Manual Predictive Models for Oregon State Highways*, Proceedings of the Transportation Research Board 90th Annual Meeting. Transportation Research Board. National Research Council, Washington, D.C., (2011).
- [7] Sun, Carlos Ph.D., P.E., JD; Brown, Henry MSCE, P.E.; Edara, Praveen Ph.D., P.E.; Carlos, Boris; and Nam, Kyuonmin Andrew, *Calibration of the Highway Safety Manual for Missouri*, Final Reports & Technical Briefs from Mid-America Transportation Center. Paper 94. (2013).
- [8] Williamson, M. and H. Zhou (2012). *Develop Calibration Factors for Crash Prediction Models for Rural Two-Lane Roadways in Illinois*. 8th International Conference on Traffic and Transportation Studies. Changsha, China, pp. 330-338, 2012.
- [9] Lubliner, Howard , *Evaluation of the Highway Safety Manual Crash Prediction Model for Rural Two-Lane Highway Segments in Kansas*. University of Kansas, (2011)
- [10] Berardo, María G.; Freire, Rodolfo G.; Marchesini, Paula; Tartabini, Mauro I.; Vanoli, Gustavo D, *Aplicación del Módulo de Accidentes del Manual de Seguridad (HSM 2010) a un tramo de Ruta Nacional N° 36 en Córdoba, Argentina*. 9° Congreso de la Vialidad Uruguaya, Montevideo (2013)
- [11] Nowakowska, M. "Logistic Models in Crash Severity Classification Based on Road Characteristics." Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board 2148, (2010)
- [12] American Association of State Highway and Transportation Officials, *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, 5th Edition, AASHTO, Washington, DC, United States (2004).
- [13] <http://www.dnit.gov.br/download/rodovias/operacoes-rodoviaras/control-de-velocidade/vmda-2009.pdf>
- [14] Sampaio Cunha Filho, Marcelo. Pesquisa Nacional de Tráfego 2011. Palestras do I Seminário do PNCT , Ministério dos Transportes, Brasil (2014).
- [15] www.dnit.gov.br

ANEXO



Fig. 1. IP=1



Fig. 5. IP=5



Fig. 2. IP=2



Fig. 6. IP=6



Fig. 3. IP=3



Fig. 7. IP=7



Fig. 4. IP=4