

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/index>
www.ucr.ac.cr / ISSN: 2215-2652

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
ENERO/JUNIO 2025 - VOLUMEN 35 (1)



Funciones de desempeño de seguridad vial para secciones de control en Costa Rica

Safety performance functions for road control sections in Costa Rica

Rodolfo Fernández Garita ¹, Henry Hernández Vega ², Jonathan Agüero Valverde ³, Diana Jiménez Romero ⁴

¹ Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Escuela de Ingeniería Civil, San José, Costa Rica.
correo: rodolfo.fernandezgarita@gmail.com

² Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Docente e investigador Escuela de Ingeniería Civil, San José, Costa Rica.
correo: henry.hernandezvega@ucr.ac.cr

³ Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Docente e investigador Escuela de Ingeniería Civil. Coordinador e investigador Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS), San José, Costa Rica.
correo: jonathan.aguero@ucr.ac.cr

⁴ Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Directora del Departamento de Ingeniería en Transportes y Urbanismo e investigadora LabTrans, Escuela de Ingeniería Civil, San José, Costa Rica.
correo: diana.jimenez@ucr.ac.cr

Palabras Clave:

Análisis de sitios de concentración de choques, Bayes empírico, Red Vial Nacional, regresión binomial negativa, seguridad vial.

Resumen

Los choques viales representan un alto costo social y económico para el país. Por esta razón, se estudia la Red Vial Nacional de Costa Rica para determinar aquellas secciones de control con potencial de mejora, utilizando funciones de desempeño de seguridad vial.

El estudio se realiza aplicando el método de exceso de frecuencia de choques esperado, ajustado con Bayes empírico. La metodología se toma del Manual de Seguridad de Carreteras de la AASHTO. El análisis se aplica a todas las secciones de control con disponibilidad de datos requeridos para la investigación, por lo que se estudian 911 secciones de control de la Red Vial Nacional.

Se realizaron los análisis para cuatro modelos de choques: totales, solo heridos leves, solo muertos o heridos graves y colisión con motocicleta. Se determinaron las secciones de control con exceso de frecuencia de choques esperado. Además, a partir de los estudios realizados, se determinó que la cantidad de accidentes se ve influenciada principalmente por tres variables: tipo de superficie, condición de señalización y ancho de superficie.

Es recomendable que se generen planes para mejorar la seguridad vial en las secciones de control con mayor exceso de frecuencia de choques esperado, debido a que representan un mayor potencial de mejora en términos de seguridad vial. Por otro lado, se sugiere estudiar las secciones de control con menor exceso de frecuencia de choques esperado para conocer las condiciones que tienen estos sitios.

Recibido: 19/07/2024
Aceptado: 20/01/2025

Keywords:

Empirical Bayes, National Road Network, negative binomial regression, network screening, safety performance functions.

Abstract

Road crashes represent a high social and economic cost for the country. For this reason, the Costa Rican National Road Network is studied to determine those control sections with potential for improvement using road safety performance functions.

The study is performed by applying the method of expected excess frequency of crashes, adjusted with empirical Bayes. The methodology is taken from the AASHTO Highway Safety Manual. The analysis is applied to all control sections with availability of data required for the research, so 911 control sections of the National Road Network are studied.

The analyses were performed for four crash models: total crashes, minor injuries only, fatalities or serious injuries only, and collisions with motorcycles. The control sections with excess frequency of expected crashes were determined. In addition, from the studies performed, it was determined that the number of crashes is mainly influenced by three variables: type of surface, sign condition, and surface width.

It is advisable to generate plans to improve road safety in the control sections with the highest excess frequency of expected crashes, since they represent a greater potential for improvement in terms of road safety. On the other hand, it is recommended to study the control sections with lower excess frequency of expected crashes, in order to know the conditions that prevail at these sites.

DOI: 10.15517/ri.v35i1.61159



SIMBOLOGÍA O NOMENCLATURA

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials.
COSEVI	Consejo de Seguridad Vial.
HSM	Highway Safety Manual.
LANAMME	Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.
MOPT	Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
RVN	Red Vial Nacional.
SIG	Sistema de Información Geográfica.
SNIT	Sistema Nacional de Información Territorial.
TPD	Tránsito Promedio Diario.
TPDA	Tránsito Promedio Diario Anual.

1. INTRODUCCIÓN

Los accidentes por choques viales representan un problema grave en Costa Rica. Según el Instituto Nacional de Estadística y Censos [1], en el año 2017, se presentaron 895 muertes por accidentes de tránsito, lo que representa aproximadamente el 3,9 % del total de defunciones de ese año. Asimismo, en 2019, hubo 817 muertes por dicha causa, es decir, el 3,4 % del total [2]. Por último, en 2021, se presentaron 733 de este tipo de defunciones, con lo que se alcanzó el 2,4 % ese año [3].

a problemática de los choques viales debe ser percibida por el Estado y por los usuarios como un costo monetario y social, ya que cada choque genera una variedad de pérdidas, tales como tiempo, vidas humanas, recursos invertidos en reparaciones, entre otros. Al realizar un estudio que identifique las secciones de control más críticas y permita hacer intervenciones que reduzcan los choques viales, se generaría una disminución en los costos descritos.

El método de exceso de frecuencia promedio de choques esperado con el ajuste de Bayes empírico se considera un método aceptado en la comunidad de la seguridad vial, ya que fue publicado en la primera edición, en el año 2010, del Highway Safety Manual (HSM) de AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) [4].

Por un lado, las funciones de desempeño de seguridad vial pueden aplicar a elementos puntuales de la red vial. Por ejemplo, en [5], se evaluó el desempeño de seguridad vial en intersecciones semaforizadas en Medellín, Colombia. Además, en el trabajo de Guadamuz-Flores, y Agüero-Valverde [6], se analizó el caso de cruces ferroviarios en Costa Rica. Asimismo, en el estudio que realizaron García, Lizarazo, Mangones, Bulla-Cruz y Darghan [7], se analizaron carriles preferenciales para autobuses. Por otro lado, estas funciones también pueden ser analizadas a nivel de toda la red vial nacional, tal como lo hizo Agüero Valverde [8].

La presente investigación adquiere relevancia debido a la falta de herramientas que orienten la toma de decisiones en materia de seguridad vial, ya que en el país existen pocos modelos de desempeño que permitan identificar con sustento científico aquellas zonas que requieran ser intervenidas de forma prioritaria para mejorar la seguridad vial. Asimismo, el mayor

aporte generado radica en que es la primera investigación en funciones de desempeño a un nivel de detalle alto utilizando secciones de control, lo que corresponde a la unidad de agregación más pequeña empleada por el MOPT para la toma de decisiones.

El estudio responde a dos preguntas principales. La primera pregunta plantea si es posible generar funciones de desempeño para toda la Red Vial Nacional con un alto nivel de detalle al utilizar secciones de control como unidad de análisis, lo que corresponde a la unidad de agregación mínima empleada por el MOPT, como se comentó anteriormente. La segunda pregunta se enfoca en la factibilidad de generar funciones de desempeño de seguridad vial enfocadas en motociclistas en Costa Rica, puesto que, en relación con la accidentabilidad de motocicletas, los estudios sobre funciones de desempeño de seguridad vial son mucho menos abundantes que las funciones de desempeño en general. Por ejemplo, para el caso de motociclistas, en Colombia, Ospina-Mateus, Quintana Jiménez, Lopez-Valdés y Sankar Sana [9] determinaron que el volumen medio diario del tráfico de motociclistas, el número de accesos (intersecciones) por kilómetro, las zonas comerciales y el tipo de camino afectan el desempeño de una vía respecto a la seguridad de los motociclistas. Similarmente, Manan, Jonsson y Várhelyi [10] desarrollaron funciones de desempeño en vías primarias de Malasia y determinaron que las fatalidades de motociclistas por kilómetro están afectadas por la cantidad de intersecciones y el volumen de motociclistas. Sin embargo, en este último estudio, se contaba con información limitada respecto a las características de la vía y su entorno.

La Red Vial Nacional está compuesta por una longitud aproximada de 7760 kilómetros, de los cuales 5927 kilómetros se encuentran en zona rural y los restantes 1832 kilómetros en zona urbana. Además, la longitud aproximada de la red vial cantonal corresponde aproximadamente a 35 086 kilómetros [11]. Lo que genera un total de 42 846 kilómetros de red vial total. El correcto funcionamiento de este complejo sistema genera beneficios económicos y sociales al país, además de generar impactos positivos sobre el desarrollo regional centroamericano.

En algunas rutas nacionales, se ha identificado una frecuencia y severidad de los choques elevada, como lo es el caso de las rutas nacionales número 32, 1, 34, entre otras [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18]. A pesar de la existencia de estudios detallados respecto a los choques esperados en algunos de los tramos más críticos, es recomendable realizar un estudio general y detallado para toda la red vial nacional. Por ello, para realizar un estudio general sobre la red vial nacional, se opta por ejecutar un estudio por secciones de control, las cuales son establecidas por la Secretaría de Planificación Sectorial del MOPT. De esto se desprende la importancia de realizar un análisis que permita identificar las secciones de control más críticas de concentración de choques viales y, con ello, promover la generación de medidas que brinden soluciones a la problemática actual y a futuro.

La escogencia de un método estadístico adecuado para la estimación de choques depende de la disponibilidad de los datos de ingreso requeridos, las limitaciones y fortalezas que presente el método y las salidas que se espera que tenga el estudio. El

HSM presenta modelos estadísticos con análisis de regresión que buscan resolver el sesgo de regresión a la media; de esta forma, se tiene una mayor confiabilidad en la estimación de la frecuencia de choques promedio esperada para el sitio de estudio.

Algunas metodologías para generar modelos estadísticos mediante la frecuencia de choques observada son Bayes empírico, Bayes jerárquico y Bayes completo. El método de Bayes empírico se clasifica en el HSM como un método predictivo; además, presenta la ventaja de que, una vez que se tiene un modelo calibrado para un sitio con condiciones particulares, el método se puede aplicar de forma sencilla [4].

Ahora, en (1), se muestra la forma de la tasa de choques de la distribución, donde β_0 corresponde al término constante, β_1 corresponde al término asociado al TPDA y el término constante $\beta_2, \beta_3, \beta_4, \dots, \beta_n$ corresponde a los coeficientes asociados a las variables 1, 2, 3, ..., n. Los coeficientes se obtienen del modelo generado y las variables son aquellas que resulten ser significativas para el modelo analizado [16].

$$f(\text{choques}) = \beta_0 + \beta_1 \epsilon(\text{TPDA}) + \beta_2 \cdot \text{variable}_2 + \dots + \beta_n \cdot \text{variable}_n \quad (1)$$

Luego, con los coeficientes estimados, se procede a calcular el número predicho de choques, esto por medio de (2), que corresponde a la función de desempeño de seguridad vial.

$$N_{pred} = e^{\beta_0} \cdot \text{TPDA}^{\beta_1} \cdot e^{\beta_2 \cdot \text{variable}_2} \cdot e^{\beta_3 \cdot \text{variable}_3} \cdot \dots \cdot e^{\beta_n \cdot \text{variable}_n} \quad (2)$$

Consecutivamente, se realiza un ajuste por peso para verificar la confiabilidad de la función de desempeño de seguridad vial. El peso se calcula por medio de (3), donde w es el peso de Bayes empírico y ϕ es el parámetro de sobredispersión de la función de desempeño de seguridad. En este caso, un valor de sobredispersión bajo se traduce en una mayor confiabilidad y un ajuste por peso grande, con lo que se tiene una función de desempeño más confiable [4].

$$w = \frac{1}{1 + \phi(N_{pred})} \quad (3)$$

Posteriormente, para el cálculo de la frecuencia de choques esperados total, se emplea (4), en donde N_{obs} corresponde a la cantidad de choques observados.

$$N_{esp} = w \cdot N_{pred} + (1 - w) \cdot N_{obs} \quad (4)$$

Finalmente, para obtener el exceso de frecuencia de choques esperado, se emplea (5).

$$\Delta = N_{esp} - N_{pred} \quad (5)$$

2. METODOLOGÍA

El objetivo de la investigación es determinar las secciones de control con potencial de mejora en la Red Vial Nacional de Costa Rica, utilizando el método de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes empírico, lo cual permita a la administración generar planes específicos de seguridad vial que busquen reducir la severidad y frecuencia de los choques viales.

Para el presente estudio, se utiliza una base de datos de accidentes de tránsito georreferenciados en la Red Vial Nacional suministrada por el Consejo de Seguridad Vial. Además, se utiliza la información de inventario de la Red Vial Nacional que separa los tramos de carretera en secciones de control. Aplicando un sistema de información geográfica, se asignó cada accidente a una sección de control de la Red Vial Nacional.

Una vez que se tiene la base de datos para cada uno de los modelos con todas las variables por analizar, esta se debe codificar de tal forma que aquellas variables que sean descriptivas se acomoden de manera que se coloque en primer lugar la descripción con la condición óptima. Esto para facilitar la interpretación del modelo. Para ello, se empleó el *software* Microsoft Excel.

Antes de modelar las regresiones binomiales negativas, se realizan labores de limpieza a la base de datos; por ejemplo, se eliminan o se recodifican los datos vacíos como una categoría adicional. Además, se recodificó nuevamente la base de datos para algunas categorías de ciertas variables que tienen muy poca frecuencia, o que responden a condiciones muy particulares de un sector, debido a su poca representatividad dentro de las características de la RVN. Esto se realiza agrupando clasificaciones con condiciones similares en una sola clasificación, o bien, indicando como “Otros” cuando se tienen clasificaciones con muy pocas observaciones.

Una vez que se tiene la base de datos debidamente corregida, se generan distintas modelaciones que se van refinando de manera sucesiva; para esto, se emplea el *software* de análisis estadístico R-Studio. En cada nuevo modelo, se elimina la variable menos significativa. Este proceso se repite de forma iterativa hasta que al menos una categoría de cada variable sea significativa.

Se aclara que, en caso de que las variables del modelo final tengan una significancia muy cercana al límite de aceptación, se debe verificar mediante una prueba de máxima verosimilitud si el aporte al modelo es significante o no.

Finalmente, se obtiene como resultado el valor estimado de cada coeficiente con sus respectivos valores de desviación estándar, error, valor de Z y su nivel de significancia. El valor estimado de cada coeficiente es el que se emplea para definir la función de desempeño.

En la Fig. 1, se aprecia de forma gráfica la secuencia de actividades seguidas en la investigación.

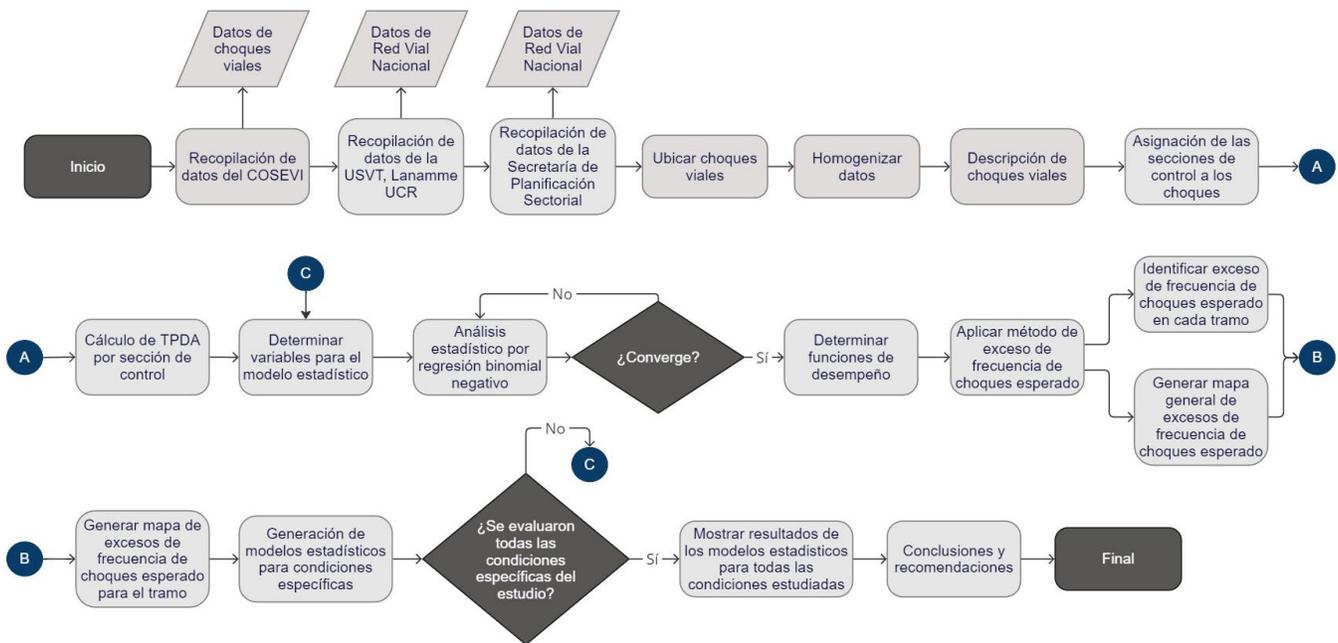


Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología de la investigación.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS

Los datos de la información de los choques viales ocurridos en la Red Vial Nacional de Costa Rica fueron facilitados por el Consejo de Seguridad Vial (COSEVI). Cada entrada de choques incluye datos sobre gravedad del accidente, tipo de accidente, año, mes, día, hora, provincia, cantón, distrito, número de ruta, número de kilómetro, coordenada “X” y “Y” (ambas en sistema CRTM05), tipo de zona, estado del tiempo y tipo de calzada. Otras variables, como lo son el ancho de carril, ancho y tipo de espaldón, alineamiento horizontal y vertical e iluminación, se obtuvieron por medio de otra base de datos de inventario de la Red Vial Nacional de la Secretaría de Planificación Sectorial del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) y de información pública en el portal del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT).

A. Datos de choques viales

Esta sección representa de forma estadística descriptiva las condiciones de los choques viales reportados en el periodo

de estudio (2017, 2018 y 2019) para la Red Vial Nacional de Costa Rica. La finalidad de esta sección es identificar patrones en la ocurrencia de los choques viales a partir de la base de datos suministrada por el Consejo de Seguridad Vial.

La estadística descriptiva para las variables continuas empleadas en el modelo se detalla en el CUADRO I y, a continuación, se explican las columnas del cuadro:

1. TPDA: volumen de tráfico de la sección de control correspondiente a la suma de los tres años de estudio.
2. Longitud: longitud de la sección de control expresada en kilómetros de las secciones de control.
3. Número de carriles: cantidad de carriles en la sección de control.
4. Ancho de superficie: ancho en metros de la sección de control correspondiente a la superficie de rodamiento.
5. Ancho de carril: ancho promedio en metros de la sección de control correspondiente al ancho de un carril.
6. Ancho de espaldón: ancho en metros de la sección de control correspondiente al espacio de espaldón.
7. Velocidad: velocidad en kilómetros por hora indicada en el inventario de la Red Vial Nacional.

CUADRO I
ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS SECCIONES
DE CONTROL INCLUIDAS EN EL ANÁLISIS

	TPDA	Longitud (km)	Número de carriles	Ancho de superficie (m)	Ancho de carril (m)	Ancho de espaldón (m)	Velocidad (km/h)
Mínimo	28	0,24	1,00	1,30	0,65	0,00	5,00
Primer cuartil	3119	2,74	2,00	5,70	2,95	0,00	35,00
Media	10975	5,17	2,00	6,30	3,25	0,00	40,00
Promedio	26096	6,64	2,14	7,09	3,37	0,15	45,03
Tercer cuartil	31321	9,15	2,00	7,25	3,65	0,00	50,00
Máximo	317303	32,28	7,00	24,90	7,20	5,50	90,00
Desviación estándar	41184	5,29	0,81	2,81	0,67	0,45	15,59

Respecto al TPDA, se toma como base el Anuario de información de tránsito 2020, ya que este reporta el valor de TPDA levantado del año 2019 hacia atrás. Luego, se procede a determinar el valor del porcentaje de crecimiento, por lo que se revisa el anuario que reporte este valor más cercano al periodo de estudio; por lo tanto, se emplean los valores del Anuario de información de tránsito 2015.

Ahora, ya que se tienen secciones que no tienen valor de porcentaje de crecimiento reportado, se procede a calcular un porcentaje de crecimiento promedio por provincia. En caso de que se tenga una sección de control que no reporte porcentaje de crecimiento, se utiliza este valor calculado.

Para los tres años de estudio, se procede a obtener el valor de TPDA, calculado por medio de (6):

$$TPDA_{Año\ final} = TPDA_{Año\ inicial} \cdot (1 + \%_{crecimiento})^{Año\ final - Año\ inicial} \quad (6)$$

Finalmente, para determinar el valor de TPDA para la sección de control, se suman los tres valores de TPDA calculados para cada sección de control. Este valor será el que se utilice en los modelos de análisis.

4. RESULTADOS

La base de datos suministrada por el Consejo de Seguridad Vial (COSEVI) incluye 44 635 accidentes. De estos, 19 926 ocurrieron en rutas nacionales primarias; 10 784, en rutas de la Red Nacional secundaria; y 13 925, en la Red Vial Nacional terciaria. Del total de accidentes, 7478 corresponden a accidentes con fallecidos o con heridos graves y 37 157, solo con heridos leves. Para ambos casos, destaca la cantidad de colisiones con motociclistas (ver CUADROS II y III).

CUADRO II
DISTRIBUCIÓN DE LOS ACCIDENTES CON MUERTOS O HERIDOS GRAVES POR
TIPO DE RUTA Y POR TIPO DE ACCIDENTE

Código de accidente	Ruta primaria	Ruta secundaria	Ruta terciaria	Total general
Atropello a persona	557	226	300	1083
Atropello animal	23	25	19	67
Caída de algún ocupante	39	45	43	127
Colisión con bicicleta	302	95	182	579
Colisión con motocicleta	1451	718	961	3130
Colisión con objeto fijo	143	92	98	333
Colisión entre vehículos	781	189	168	1138
Desconocido	2		4	6
Objeto sobre vehículo	8	1	5	14
Otros	48	13	28	89
Salió de la vía	330	125	174	629
Vuelco	114	89	80	283
Total de accidentes con muertos o graves	3798	1618	2062	7478

CUADRO III
DISTRIBUCIÓN DE LOS ACCIDENTES SOLO CON
HERIDOS LEVES ANALIZADOS POR TIPO DE RUTA
Y POR TIPO DE ACCIDENTE

Código de accidente	Ruta primaria	Ruta secundaria	Ruta terciaria	Total general
Atropello a persona	1161	1014	1241	3416
Atropello animal	118	63	123	304
Caída de algún ocupante	665	350	610	1625
Colisión con bicicleta	963	575	900	2438
Colisión con motocicleta	5843	4297	5000	15140
Colisión con objeto fijo	513	226	300	1039
Colisión entre vehículos	4072	1601	1768	7441
Desconocido	12	9	13	34
Objeto sobre vehículo	43	11	14	68
Otros	229	94	159	482
Salió de la vía	1521	460	998	2979
Vuelco	988	466	737	2191
Total de accidentes con muertos o graves	16128	9166	11863	37157

Los valores de salida del *software* empleado indican el nombre de la variable, la estimación de esta, el error estándar, el valor del estadístico Z, la probabilidad y la significancia. El signo del valor en la columna de estimación indica si la variable tiene una afectación negativa o positiva en la ocurrencia de choques viales. De esta forma, si la estimación corresponde a un valor negativo, un cambio positivo de una unidad en la variable representa una disminución en la ocurrencia de choques predicha por el modelo.

El proceso es iterativo, por lo cual se parte de un modelo con todas las variables y, luego, las variables menos significativas se eliminan una a una hasta llegar a un modelo en el que todas las variables contengan al menos una condición significante. La variable de *Grip* resultó ser la menos significativa en prácticamente todos los modelos. Se corrió un modelo solo con secciones de

control que reportaran algún valor de *Grip*, sin embargo, se obtuvo el mismo resultado que los otros modelos, por lo que se identifica la variable como la de menor significancia.

A continuación, se presentan los resultados para los siguientes modelos generados:

- A. choques totales;
- B. choques con solo heridos leves;
- C. choques con solo muertos o heridos graves;
- D. choques con colisión con motocicleta.

A. Modelo para choques totales

De los resultados obtenidos para el modelo de choques totales, se tiene que las variables con evidencia estadística de que inciden en la ocurrencia de choques corresponden a TPDA, ancho de superficie, condición de espaldón, condición de superficie, tipo de terreno, tipo de superficie, número de carriles, velocidad, condición del espaldón, condición de señalización, condición de drenaje y condición de superficie (ver CUADRO IV).

Respecto al tipo de terreno, se identifica que todos los tipos de terreno distintos a la condición base tienen evidencia estadística de que reducen la ocurrencia de choques. Los resultados son contraintuitivos, lo que podría explicarse al tomar en consideración que la velocidad de operación es menor al encontrarse en terrenos más ondulados, por lo que se puede justificar que la probabilidad de ocurrencia de choques sea menor en estos casos.

El tipo de superficie base corresponde a la carpeta asfáltica, mientras que el tipo de superficie 2, a tratamiento superficial y el tipo de superficie 3, a lastre o grava. Los resultados presentan un análisis similar al detallado para la variable de tipo de terreno, ya que se explican al considerar que la velocidad de operación tiende a reducirse en tipos de superficie de menor calidad.

El número de carriles, según los resultados del modelo, disminuye la probabilidad de ocurrencia de choques conforme aumenta su cantidad. Al tener una mayor cantidad de carriles, los vehículos pueden circular a distintas velocidades sin exponer a otros usuarios a realizar maniobras indebidas.

El ancho de superficie indica que un ancho mayor aumenta la probabilidad de ocurrencia de choques. El resultado es contraintuitivo, sin embargo, un ancho de superficie mayor genera una sensación de seguridad mayor a los conductores, lo cual puede incentivarlos a prestar menor atención a la carretera.

CUADRO IV
RESULTADO DE LA REGRESIÓN BINOMIAL NEGATIVA PARA CHOQUES TOTALES

Parámetro	Variable	Estimación	Error estándar	Valor de Z	Pr	Significancia
β_0	Intercepto	-4,277	0,344	-12,435	< 2,00E-16	***
β_1	TPDA	0,707	0,031	23,099	< 2,00E-16	***
β_2	Tipo de terreno condición 2	-0,086	0,065	-1,324	0,185	
β_3	Tipo de terreno condición 3	-0,347	0,072	-4,800	0,000	***
β_4	Tipo de terreno condición 4	-0,593	0,088	-6,737	1,62E-11	***
β_5	Tipo de superficie condición 2	-0,278	0,084	-3,314	9,20E-04	***
β_6	Tipo de superficie condición 3	-0,822	0,130	-6,300	2,98E-10	***
β_7	Tipo de superficie condición 4	-0,192	0,128	-1,500	1,34E-01	
β_8	Número de carriles	-0,246	0,076	-3,253	0,001	**
β_9	Ancho de superficie	0,136	0,024	5,550	2,86E-08	***
β_{10}	Velocidad	-0,021	0,002	-8,609	< 2,00E-16	***
β_{11}	Condición de espaldón 2	0,154	0,134	1,156	2,48E-01	
β_{12}	Condición de espaldón 3	-0,128	0,263	-0,486	0,627	
β_{13}	Condición de espaldón 4	-0,769	0,354	-2,172	0,030	*
β_{14}	Condición de espaldón 5	-0,025	0,101	-0,250	0,803	
β_{15}	Condición de señalización 2	-0,001	0,086	-0,017	0,986	
β_{16}	Condición de señalización 3	-0,048	0,075	-0,644	0,520	
β_{17}	Condición de señalización 4	-0,252	0,121	-2,085	0,037	*
β_{18}	Condición de señalización 5	-0,563	0,182	-3,100	0,002	**
β_{19}	Condición de drenaje 2	-0,161	0,072	-2,229	0,026	*
β_{20}	Condición de drenaje 3	-0,227	0,100	-2,274	0,023	*
β_{21}	Condición de drenaje 4	-1,096	0,319	-3,440	0,001	***
β_{22}	Condición de superficie 2	0,174	0,080	2,168	0,030	*
β_{23}	Condición de superficie 3	0,003	0,081	0,043	0,966	
β_{24}	Condición de superficie 4	0,071	0,086	0,826	0,409	
β_{25}	Condición de superficie 5	-0,044	0,211	-0,210	0,833	

Códigos de significancia: 0 < “***” < 0,001 < “**” < 0,01 < “*” < 0,05 < “.” < 0,1 < “ ” < 1

(Para binomial negativo, el parámetro de dispersión [2,2051] se toma como 1)

Desviación nula: 4634,5 en 910 grados de libertad

Desviación residual: 1039,1 en 885 grados de libertad

AIC: 6666,5

Número de interacciones de Fisher: 1

Theta: 2,205

Error estándar: 0,128

2 x log-likelihood: -6612,546

El aumento de la velocidad, según el modelo, reduce la probabilidad de ocurrencia de choques. Este resultado también puede llegar a encontrarse contradictorio. Se podría entender considerando que existen muchos accidentes que ocurren en intersecciones, lugares donde la velocidad reglamentaria y operativa es menor en comparación a zonas sin ellas, que suelen presentar velocidades mayores.

Respecto a la condición del espaldón, se aplica un razonamiento análogo al que se ha empleado cuando el resultado es contradictorio: cuando hay condiciones peores a la condición base, se presenta una reducción de la velocidad y una mayor atención por parte de los conductores, lo que reduce probabilidad de ocurrencia de choques. De forma similar al caso anterior, los conductores toman una postura de conducción a la defensiva,

reduciendo la velocidad y prestando mayor atención a la vía, lo que produce una reducción probabilidad de ocurrencia de choques.

La condición del drenaje, según el modelo, reduce la probabilidad de ocurrencia de choques. La condición 2 aplica para los casos en los que el agua se estanca en algunos sitios en la entrada de alcantarillas; la condición 3, cuando se presenta con erosión o socavación (no tiene capacidad hidráulica suficiente); y la condición 4, para "Otros". Este resultado también puede llegar a encontrarse contradictorio. No obstante, al tener malas condiciones de drenaje, los conductores identifican los riesgos asociados, reducen la velocidad y prestan una atención mayor a la vía, lo que produce una reducción en la probabilidad de ocurrencia de choques.

Respecto a la superficie de ruedo, se tiene como una condición significativa cuando se presenta una condición de superficie de ruedo con pequeñas corrugaciones. En este caso,

se aplica un razonamiento análogo al que se ha empleado cuando el resultado es contradictorio, ya que esta condición aumenta la probabilidad de ocurrencia de choques en contraste a la condición base. Al presentar una condición buena, se presenta un aumento de la velocidad y una menor atención por parte de los conductores, lo que aumenta la probabilidad de ocurrencia de choques.

En cuanto a exceso de accidentes, en la Fig. 2, se encuentran marcadas en rojo la Ruta Nacional 1 en Guanacaste, la Ruta Nacional 2 en Pérez Zeledón y la Ruta Nacional 17 en Puntarenas. En el Área Metropolitana, llaman la atención la Ruta Nacional 1 en Alajuela, al oeste del cruce con la radial de Alajuela, la Ruta Nacional 3 entre el centro de Heredia y el cruce de La Valencia, la Ruta Nacional 218 en los sectores de El Alto y el centro de Guadalupe y la Ruta Nacional 206 en San Miguel de Desamparados.

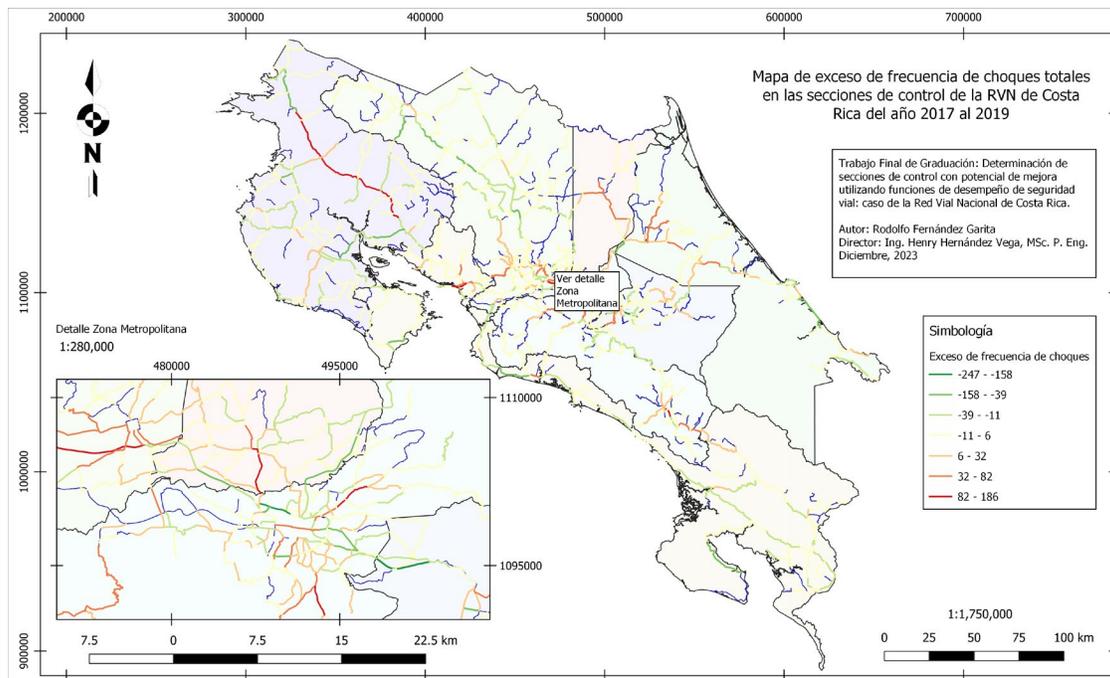


Fig. 2. Mapa de exceso de frecuencia de choques totales en las secciones de control de la RVN de Costa Rica del año 2017 al 2019.

B. Modelo para choques con solo heridos leves

Los resultados obtenidos para el modelo de choques con solo heridos leves se muestran en el CUADRO V. Las variables que tienen evidencia estadística de que inciden en la ocurrencia de choques corresponden al TPDA, ancho de superficie, condición de espaldón, condición de superficie, tipo de terreno, tipo de superficie, número de carriles, velocidad, condición del espaldón, condición de señalización y condición de drenaje.

El análisis que se realiza para explicar el resultado del modelo es prácticamente el mismo que el aplicado en el modelo anterior, ya que se identifica el mismo comportamiento en las variables. Además, el resultado contiene las mismas variables significantes que el modelo anterior. Esto es esperable, puesto que la cantidad de choques con solo heridos leves es muy alta y esta ejerce un dominio sobre el modelo general.

CUADRO V
RESULTADO DE LA REGRESIÓN BINOMIAL NEGATIVA PARA CHOQUES CON SOLO HERIDOS LEVES

Parámetro	Variable	Estimación	Error estándar	Valor de Z	Pr	Significancia
β_0	Intercepto	-4,991	0,376	-13,268	< 2,0E-16	***
β_1	TPDA	0,787	0,034	23,407	< 2,0E-16	***
β_2	Tipo de terreno condición 2	-0,062	0,071	-0,876	0,381	
β_3	Tipo de terreno condición 3	-0,257	0,078	-3,269	0,001	**
β_4	Tipo de terreno condición 4	-0,493	0,096	-5,142	0,000000271	***
β_5	Tipo de superficie condición 2	-0,268	0,091	-2,932	0,003	**
β_6	Tipo de superficie condición 3	-0,862	0,144	-6,006	1,90E-09	***
β_7	Tipo de superficie condición 4	-0,156	0,139	-1,125	0,260	
β_8	Número de carriles	-0,255	0,082	-3,108	0,002	**
β_9	Ancho de superficie	0,142	0,027	5,360	8,34E-08	***
β_{10}	Velocidad	-0,027	0,003	-10,393	< 2,0E-16	***
β_{11}	Condición de espaldón 2	0,054	0,144	0,378	0,706	
β_{12}	Condición de espaldón 3	-0,253	0,287	-0,883	0,377	
β_{13}	Condición de espaldón 4	-0,801	0,385	-2,080	0,038	*
β_{14}	Condición de espaldón 5	-0,081	0,109	-0,737	0,461	
β_{15}	Condición de señalización 2	-0,016	0,093	-0,173	0,862	
β_{16}	Condición de señalización 3	-0,051	0,081	-0,628	0,530	
β_{17}	Condición de señalización 4	-0,286	0,133	-2,152	0,031	*
β_{18}	Condición de señalización 5	-0,528	0,202	-2,618	0,009	**
β_{19}	Condición de drenaje 2	-0,141	0,078	-1,815	0,070	.
β_{20}	Condición de drenaje 3	-0,237	0,108	-2,190	0,028	*
β_{21}	Condición de drenaje 4	-1,260	0,374	-3,368	0,001	***
β_{22}	Condición de superficie 2	0,189	0,087	2,182	0,029	*
β_{23}	Condición de superficie 3	0,005	0,088	0,052	0,958	
β_{24}	Condición de superficie 4	0,078	0,093	0,841	0,400	
β_{25}	Condición de superficie 5	0,014	0,227	0,063	0,950	

Códigos de significancia: 0 < “****” < 0,001 < “***” < 0,01 < “**” < 0,05 < “.” < 0,1 < “ ” < 1

(Para binomial negativo, el parámetro de dispersión [1,912] se toma como 1)

Desviación nula: 4468,2 en 910 grados de libertad

Desviación residual: 1042,1 en 885 grados de libertad

AIC: 6328,2

Número de interacciones de Fisher: 1

Theta: 1,912

Error estándar: 0,113

2 x log-likelihood: -6274,185

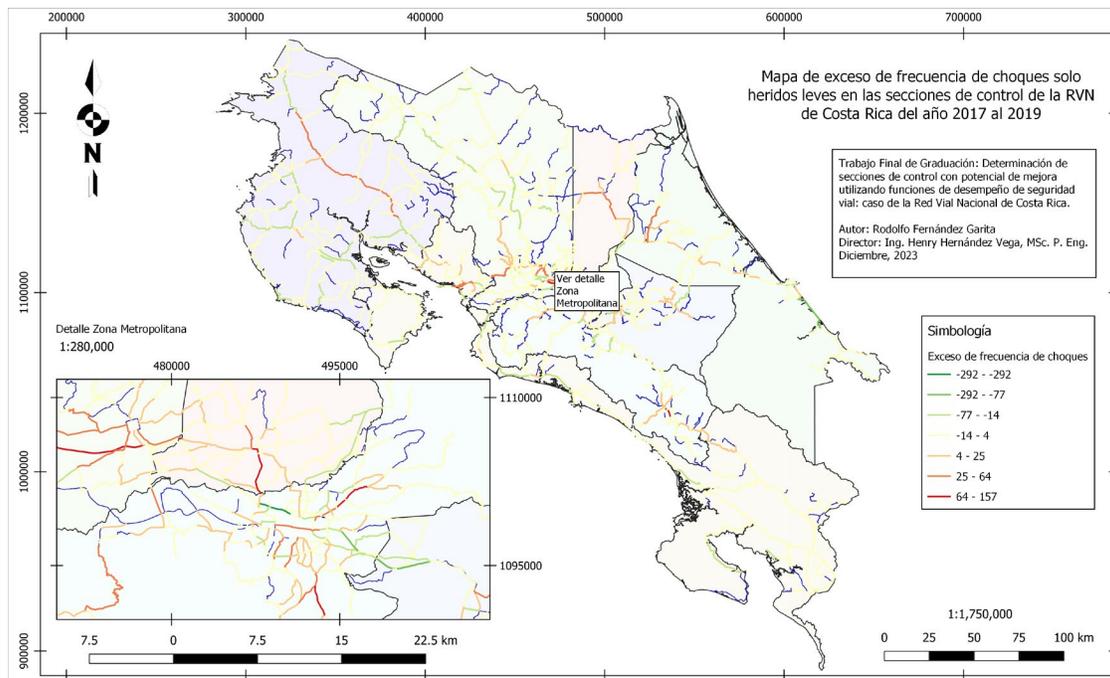


Fig. 3. Mapa de exceso de frecuencia de choques con solo heridos leves en las secciones de control de la RVN de Costa Rica del año 2017 al 2019.

De la Fig. 3, se resaltan de manera visual la Ruta Nacional 2, de San Isidro del General hasta Palmares, la Ruta Nacional 218, del cruce de Coronado hasta el cruce de Moravia, la Ruta Nacional 1, de Río Segundo hasta Bajo Las Iguanas y la Ruta Nacional 3, del Puente Yolanda Oreamuno sobre el río Virilla hasta el centro de Heredia, el cruce entre Ruta Nacional 3 y la calle Rubén Darío.

C. Modelo para choques con solo muertos o heridos graves

El CUADRO VI presenta los resultados de la regresión binomial negativa para choques con solo muertos o graves. De los resultados obtenidos para este modelo, las variables que cuentan con evidencia estadística de que inciden en la ocurrencia de choques corresponden al TPD, ancho de superficie, alineamiento horizontal, alineamiento vertical, condición de espaldón y condición de señalización, tipo de terreno, tipo de superficie, alineamiento horizontal, alineamiento vertical, condición del espaldón, condición de señalización y estructura de pavimento.

En este modelo, se presenta una diferencia mayor en comparación con las variables significativas de los dos modelos anteriores, especialmente para las variables de alineamiento horizontal, alineamiento vertical y condición de la estructura de pavimento, las cuales no se presentaban como significativas en modelos previos.

Se señala que el análisis para las variables de tipo de terreno, tipo de superficie, ancho de superficie, condición de espaldón y señalización plantean un análisis muy similar a los dos modelos anteriores. Esto, pues el comportamiento de aumentar o reducir

la probabilidad de ocurrencia de choques es el mismo, con la diferencia de que el valor de la estimación varía ligeramente.

Ahora, respecto a las variables que no se identificaron como significativas en modelos previos, se tiene el alineamiento horizontal que, cuando presenta algunas curvas que exigen una reducción significativa en la velocidad promedio de circulación, este aumenta la probabilidad de ocurrencia de choques. Por otro lado, cuando presenta una condición muy sinuosa en todo el tramo, condición que admite solamente una velocidad de circulación muy baja, ocurre un efecto contrario. Nuevamente, el análisis que se le puede dar a este resultado es bajo el concepto de que la primera condición citada genera en los conductores una sensación de seguridad mayor en comparación a la última condición mencionada. Estos pueden verse incentivados a aumentar la velocidad en carretera y, con ello, incrementa la probabilidad de ocurrencia de choques.

Para el alineamiento vertical, se tiene que, para condiciones que presentan pendientes menores del 3 % con algunas cuestas del 5 %, se identifica una disminución en la probabilidad de ocurrencia de choques. Por otro lado, para condiciones de carretera que poseen pendientes de entre 3 y 6 %, se observa un aumento en la probabilidad de ocurrencia de choques. En este caso, se resalta el hecho de que existen valores de pendiente iguales en ambos casos, sin embargo, debido a que la Secretaría de Planificación Sectorial agrupa de esta forma las pendientes, se clasifica un sitio en una categoría o en otra. Debido a esta incertidumbre a la hora de clasificar el alineamiento vertical de un sitio, no se puede realizar un análisis que explique adecuadamente el comportamiento del alineamiento vertical en el modelo presentado.

En cuanto a la condición de la estructura de pavimento, se recuerda que la condición base corresponde cuando no se presenta fallas y que la condición significativa es cuando se cataloga como “Otros”. Dicha clasificación acoge condiciones cuando “existen corrugaciones o huellas profundas sobre casi toda la faja de rueda del tramo, hasta tal grado que no sería factible corregir la falla de la estructura, sino que se tendría que reconstruirla completamente”, “existen deformaciones u otras fallas de consideración sobre la

mayor parte del tramo” y “existen deformaciones u otras fallas de consideración sobre una buena parte de la subsección y, aunque no son extensas todavía, parece que siguen extendiéndose” (estas categorías corresponden a las incluidas en el inventario de vías a nivel nacional [19]). Así, el efecto que tiene en el modelo es de reducción sobre la probabilidad de ocurrencia de choques y se podría explicar mediante una reducción de la velocidad por el mal estado de la carretera.

CUADRO VI
RESULTADO DE LA REGRESIÓN BINOMIAL NEGATIVA PARA CHOQUES CON SOLO MUERTOS O GRAVES

Parámetro	Variable	Estimación	Error estándar	Valor de Z	Pr	Significancia
β_0	Intercepto	-4,431	0,357	-12,428	< 2,00E-16	***
β_1	TPDA	0,442	0,038	11,782	< 2,00E-16	***
β_2	Tipo de terreno condición 2	-0,129	0,132	-0,981	0,326	
β_3	Tipo de terreno condición 3	-0,567	0,176	-3,217	0,001	**
β_4	Tipo de terreno condición 4	-0,850	0,203	-4,186	0,000	***
β_5	Tipo de superficie condición 2	-0,243	0,100	-2,437	0,015	*
β_6	Tipo de superficie condición 3	-0,589	0,150	-3,926	0,000	***
β_7	Tipo de superficie condición 4	-0,365	0,160	-2,284	0,022	*
β_8	Ancho de superficie	0,043	0,014	3,107	0,002	**
β_9	Alineamiento horizontal condición 2	0,640	0,254	2,522	0,012	*
β_{10}	Alineamiento horizontal condición 3	-0,142	0,173	-0,821	0,412	
β_{11}	Alineamiento horizontal condición 4	-0,061	0,087	-0,707	0,480	
β_{12}	Alineamiento horizontal condición 5	-0,362	0,120	-3,008	0,003	**
β_{13}	Alineamiento vertical condición 2	-0,273	0,186	-1,470	0,142	
β_{14}	Alineamiento vertical condición 3	-0,751	0,456	-1,647	0,099	,
β_{15}	Alineamiento vertical condición 4	0,245	0,105	2,332	0,020	*
β_{16}	Alineamiento vertical condición 5	0,084	0,133	0,631	0,528	
β_{17}	Condición de espaldón 2	0,232	0,170	1,365	0,172	
β_{18}	Condición de espaldón 3	0,307	0,202	1,516	0,129	
β_{19}	Condición de espaldón 4	0,339	0,142	2,382	0,017	*
β_{20}	Condición de espaldón 5	-0,059	0,340	-0,173	0,863	
β_{21}	Condición de señalización 2	-0,898	0,396	-2,269	0,023	*
β_{22}	Condición de señalización 3	0,147	0,185	0,792	0,428	
β_{23}	Condición de señalización 4	0,099	0,091	1,092	0,275	
β_{24}	Condición de señalización 5	0,008	0,076	0,110	0,912	
β_{25}	Condición de estructura de pavimento 2	-0,136	0,146	-0,931	0,352	
β_{26}	Condición de estructura de pavimento 3	-0,741	0,267	-2,778	0,005	**

Códigos de significancia: 0 < “****” < 0,001 < “***” < 0,01 < “**” < 0,05 < “.” < 0,1 < “ ” < 1

(Para binomial negativo, el parámetro de dispersión [2,5151] se toma como 1)

Desviación nula: 2498,37 en 910 grados de libertad

Desviación residual: 963,84 en 884 grados de libertad

AIC: 3975,6

Número de interacciones de Fisher: 1

Theta: 2,515

Error estándar: 0,215

2 x log-likelihood: -3919,566

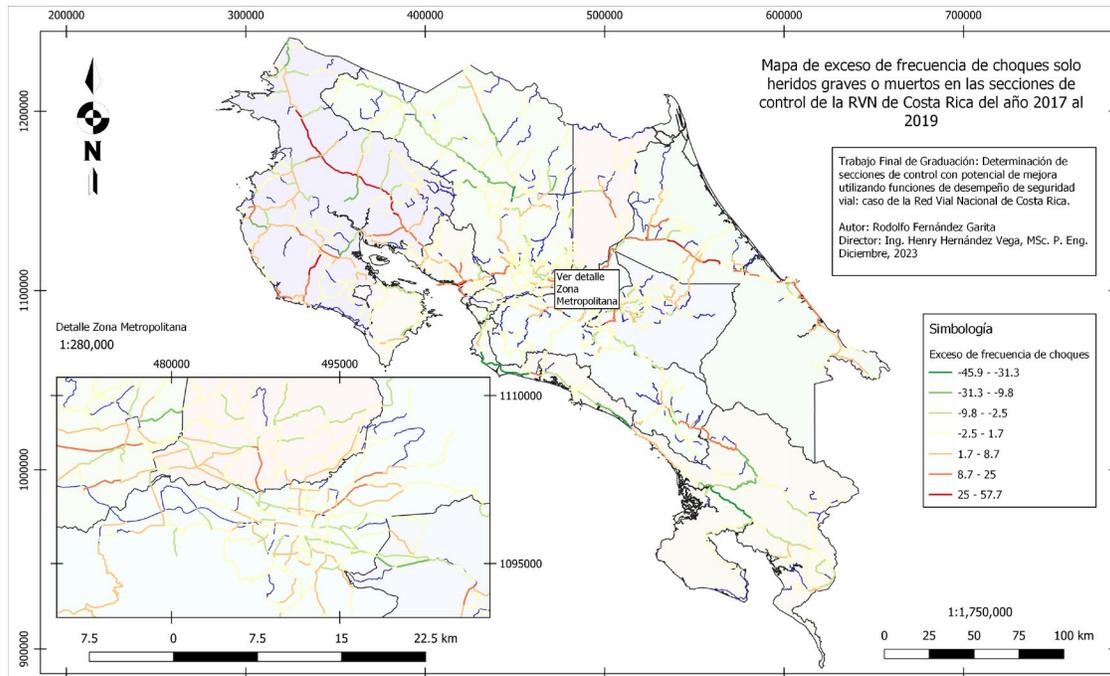


Fig. 4. Mapa de exceso de frecuencia de choques con solo muertos o graves en las secciones de control de la RVN de Costa Rica del año 2017 al 2019.

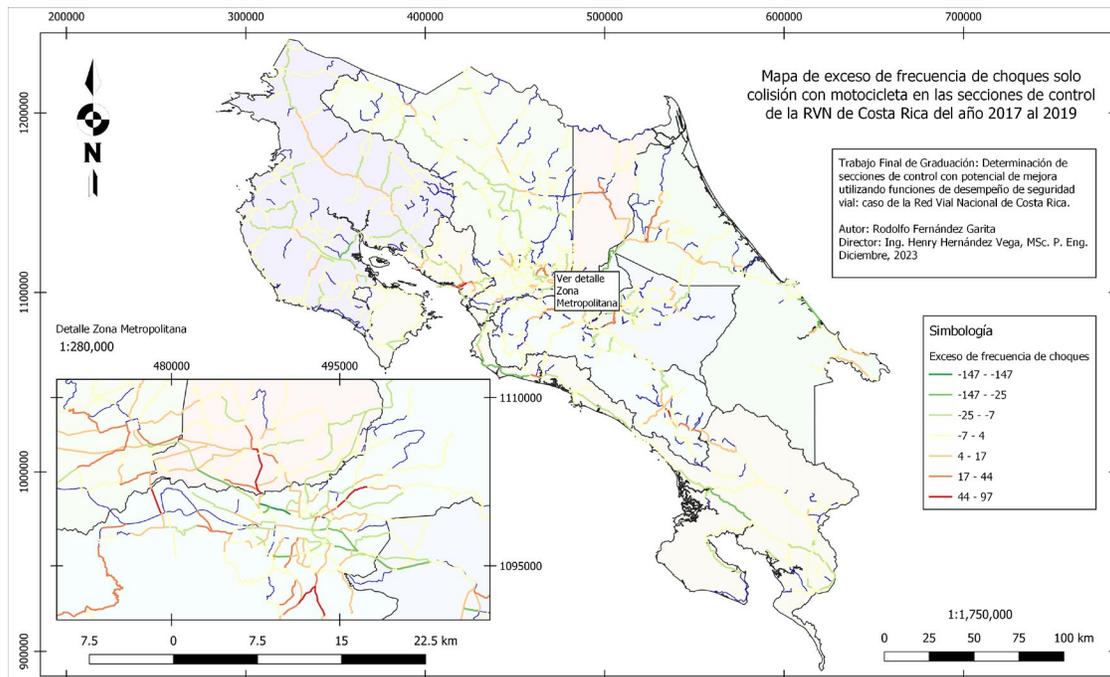


Fig. 5. Mapa de exceso de frecuencia de choques con solo colisión con motocicleta en las secciones de control de la RVN de Costa Rica del año 2017 al 2019.

CUADRO VII
RESULTADO DE LA REGRESIÓN BINOMIAL NEGATIVA PARA CHOQUES CON SOLO
COLISIÓN CON MOTOCICLETA

Parámetro	Variable	Estimación	Error estándar	Valor de Z	Pr	Significancia
β_0	Intercepto	-5,622	0,382	-14,734	< 2,00E-16	***
β_1	TPDA	0,796	0,038	21,073	< 2,00E-16	***
β_2	Tipo de terreno condición 2	-0,045	0,076	-0,596	0,551	
β_3	Tipo de terreno condición 3	-0,420	0,085	-4,919	8,69E-07	***
β_4	Tipo de terreno condición 4	-0,955	0,109	-8,785	< 2,00E-16	***
β_5	Tipo de superficie condición 2	-0,304	0,101	-3,004	2,66E-03	**
β_6	Tipo de superficie condición 3	-0,917	0,163	-5,622	1,89E-08	***
β_7	Tipo de superficie condición 4	-0,204	0,153	-1,332	1,83E-01	
β_8	Número de carriles	-0,256	0,089	-2,887	0,004	**
β_9	Ancho de superficie	0,135	0,029	4,683	2,83E-06	***
β_{10}	Velocidad	-0,028	0,002	-11,635	< 2,00E-16	***
β_{11}	Condición de señalización 2	0,057	0,093	0,619	5,36E-01	
β_{12}	Condición de señalización 3	0,002	0,078	0,025	0,980	
β_{13}	Condición de señalización 4	-0,160	0,146	-1,095	0,273	
β_{14}	Condición de señalización 5	-0,495	0,246	-2,014	0,044	*
β_{15}	Condición de drenaje 2	-0,178	0,083	-2,156	0,031	*
β_{16}	Condición de drenaje 3	-0,350	0,117	-2,989	0,003	**
β_{17}	Condición de drenaje 4	-1,030	0,435	-2,370	0,018	*

Códigos de significancia: 0 < “****” < 0,001 < “***” < 0,01 < “**” < 0,05 < “.” < 0,1 < “ ” < 1

(Para binomial negativo, el parámetro de dispersión [1,7948] se toma como 1)

Desviación nula: 4137,1 en 910 grados de libertad

Desviación residual: 1013,5 en 893 grados de libertad

AIC: 5199,6

Número de interacciones de Fisher: 1

Theta: 1,795

Error estándar: 0,118

2 x log-likelihood: -5161,606

De la Fig. 4, se identifica visualmente la Ruta Nacional 1, en la provincia de Guanacaste, desde La Sombra hasta Pelón de la Altura, la Ruta Nacional 17, del cruce de Barranca hasta la entrada a Chacarita, la Ruta Nacional 150, de Belén de Nosarita hasta el cruce con la Ruta Nacional 157.

D. Modelo para choques con colisión con motocicleta

De los resultados obtenidos para el modelo de choques con solo colisión con motocicleta, las variables con evidencia estadística de que inciden en la ocurrencia de choques corresponden al TPDA, ancho de superficie y condición de señalización, tipo de terreno, tipo de superficie, número de carriles, velocidad, condición de señalización y condición de drenaje (ver CUADRO VII).

El análisis que se realiza para explicar el resultado del modelo es muy similar al realizado para los modelos de choques totales y de choques con solo heridos leves, ya que se identifica el mismo comportamiento en las variables que resultan ser significativas. Sin embargo, se destaca que este modelo cuenta con una cantidad de variables significativas menor que los dos modelos citados. Esto es esperable, pues la cantidad de choques con motocicleta es muy alta, por lo que está muy ligada al modelo general y al modelo de solo choques con heridos leves.

De la Fig. 5, se señala de forma particular la Ruta Nacional 2, de San Isidro del General hasta Palmares, la Ruta Nacional 218, del cruce de Coronado hasta el cruce de Moravia, la Ruta Nacional 3, del Puente Yolanda Oreamuno sobre el río Virilla hasta el centro de Heredia, el cruce entre Ruta Nacional 3 y la calle Rubén Darío.

E. Método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes empírico

El conjunto de las diez secciones de control con mayor cantidad de exceso de choques totales presenta un exceso de 1143

accidentes de tránsito totales. De manera similar, se identifica en diez secciones de control un exceso de 778 colisiones con heridos leves, 330 colisiones con heridos graves o fallecidos y un exceso de 572 colisiones con motociclistas involucrados (ver CUADRO VIII).

CUADRO VIII
DIEZ SECCIONES DE CONTROL CON EXCESO DE FRECUENCIA DE CHOQUES ESPERADO PARA LAS CONDICIONES ANALIZADAS

Choques totales		Heridos leves		Solo muertos o graves		Solo choques con motocicletas	
Sección de control	Exceso de frecuencia de choques (Δ)	Sección de control	Exceso de frecuencia de choques (Δ)	Sección de control	Exceso de frecuencia de choques (Δ)	Sección de control	Exceso de frecuencia de choques (Δ)
10003	186,48	10003	157,19	50040	57,70	10003	96,99
60190	127,69	20010	87,76	60621	46,43	19065	79,00
19065	118,46	40000	86,56	70090	37,82	40000	71,00
40000	111,82	19065	86,23	70141	34,87	10241	57,97
10241	111,48	10241	80,34	60190	32,26	60190	51,75
50040	109,67	60190	64,37	50651	28,99	10450	51,31
20010	109,11	10491	56,52	70070	25,05	10212	49,39
60621	105,65	60621	54,90	50171	23,77	70440	43,91
40460	81,80	40460	52,67	10003	21,92	20131	35,90
10491	80,89	19059	51,57	70130	21,39	70390	34,40
Total	1143,05	Total	778,11	Total	330,2	Total	571,62

A continuación (ver CUADRO IX), se observan las secciones de control identificadas con exceso de frecuencia de choques esperado en al menos tres de los cuatro modelos analizados. La cantidad de veces que se identifica una

sección de control en los modelos analizados es un indicativo de que la sección de control presenta un alto grado de exceso de frecuencia de choques esperado para diversas condiciones.

CUADRO IX
CLASIFICACIÓN DE LAS SECCIONES DE CONTROL IDENTIFICADAS CON EXCESO DE FRECUENCIA DE CHOQUES ESPERADO EN LOS CUATRO MODELOS ANALIZADOS

Sección de control	Clasificación de exceso de frecuencia de choques esperado				Clasificación promedio
	Totales	Heridos leves	Heridos graves y fallecidos	Motocicleta	
10003	1	1	9	1	3,0
60190	2	6	5	5	4,5
40000	4	3	16	3	6,5
19065	3	4	19	2	7,0
60621	8	8	2	18	9,0
50040	6	11	1	50	17,0
19064	14	23	11	21	17,3
60210	11	19	32	11	18,3
40522	15	18	35	16	21,0
60610	23	25	14	32	23,5
70141	16	38	4	48	26,5

Sección de control	Clasificación de exceso de frecuencia de choques esperado				Clasificación promedio
	Totales	Heridos leves	Heridos graves y fallecidos	Motocicleta	
70390	43	37	27	10	29,3
10001	34	39	18	34	31,3
11180	19	30	47	36	33,0
60081	41	46	26	26	34,8
30090	48	49	34	35	41,5

La clasificación promedio se realiza ordenando las secciones de control en orden decreciente, tomando como base el exceso de frecuencia de choques esperado para cada uno de los escenarios de análisis. Luego, se realiza un promedio de estos valores y se muestra en orden decreciente la clasificación promedio de las secciones de control que aparecen en los cuatro modelos analizados.

El resultado de este cuadro muestra cuáles son las secciones de control más críticas considerando los cuatro escenarios de análisis, por lo que se muestran las secciones de control a manera de lista de priorización de intervención en materia de seguridad vial.

Debido a que en cada modelo se realiza un análisis estadístico que verifica la significancia de cada variable, es esperable que existan cambios según cada modelo; sin embargo, no se presentan grandes cambios en la clasificación de las secciones de control críticas. Esto es apreciable en el CUADRO X, donde se observa un orden de clasificación muy similar en las secciones de control.

En el CUADRO X, se especifica el número de la Ruta Nacional, provincia y descripción del tramo en el que se ubica la sección de control, según la clasificación establecida en el cuadro anterior.

CUADRO X
DESCRIPCIÓN DE LAS SECCIONES DE CONTROL IDENTIFICADAS CON EXCESO DE FRECUENCIA DE CHOQUES ESPERADO EN LOS CUATRO MODELOS ANALIZADOS

Clasificación promedio	Sección de control	Ruta Nacional	Provincia	Descripción del tramo
3	10003	2	San José	San Isidro, Pérez Zeledón (R.243)-Palmares (Final Cinco Carriles)
4,5	60190	17	Puntarenas	Barranca (R.1)-El Roble (Paso Inferior R.23)
6,5	40000	3	Heredia	Vuelta del Virilla (río Virilla) (lte. provincial) - Heredia (R 126)(Ave/C 2)
7	19065	218	San José	Guadalupe (Ruta 200) (cruce San Vicente, Moravia) - Ipis (R. 216) (cruce San Isidro, Coronado)
9	60621	17	Puntarenas	El Roble (paso inferior R.23)-Chacarita (final a carriles) (plantel del MOPT crece línea férrea)
17	50040	1	Guanacaste	Liberia (R.21) (R.918)- Potrerillo (quebrada Puercos) (Lte. cantonal)
17,3	19064	218	San José	Santa Teresita (río Torres) (límite cantonal)-Guadalupe (R.200) (cruce Vigente de Moravia)
18,3	60210	1	Puntarenas	Esparza (R.131) - Esparza (río Barranca) (límite cantonal)
21	40522	4	Heredia	Las Vueltas de Horquetas (R.229)-Puerto Viejo, Sarapiquí (R.505)
23,5	60610	23	Puntarenas	Barranca (R.1)-Boca río Barranca (río Barranca) (límite cantonal)
26,5	70141	32	Limón	Guácimo (R.248)- Pocora (río Destierro) (límite cantonal)
29,3	70390	247	Limón	Guápiles (R.32) (calle Emilia)-Pueblo Nuevo (cruce Roxana) (R.248)
31,3	10001	2	San José	Juntas de Pacuar (R.244)-Convento (río Convento) (límite provincial)
33	11180	239	San José	Barrio Naranjito (límite cantonal)-Santiago, Puriscal (costado este de iglesia vieja)
34,8	60081	34	Puntarenas	La Palma (R.239)-La Julieta (río Parrita)
41,5	30090	2	Cartago	Barrio Nuevo (límite cantonal) (cruce Purires)-Casamata (R 406) (límite cantonal)

5. CONCLUSIONES

Se aplicaron las metodologías publicadas en el HSM 2010 de la AASHTO. El método aplicado se adapta a la información de la que disponen las autoridades costarricenses y a las características de la RVN de Costa Rica, por lo que los resultados generados son confiables.

La primera contribución del estudio radica en que es la primera investigación en funciones de desempeño para toda la Red Vial Nacional realizada con un nivel de detalle alto, el cual se genera por secciones de control. Esto corresponde a la unidad de agregación mínima empleada por el MOPT para la toma de decisiones. La segunda contribución del estudio se enfoca en la elaboración de funciones de desempeño de seguridad vial enfocadas en motociclistas, ya que, en relación con la accidentabilidad de motocicletas, los estudios sobre funciones de desempeño de seguridad vial son mucho menos abundantes que las funciones de desempeño en general.

El COSEVI facilitó información de choques viales ocurridos del 2017 al 2021; sin embargo, únicamente se utiliza la información de los años 2017 al 2019, puesto que en el 2020 ocurrió la pandemia y se optó por no utilizar los datos después de dicho año. La cantidad de choques viales reportados dentro de la RVN en el periodo de estudio (2017, 2018 y 2019) corresponde a 27 319 choques.

La Secretaría de Planificación Sectorial también facilitó la información de las secciones de control de la RVN de Costa Rica. La base de datos incluía caracterización para un total de 1219 secciones de control.

No cuentan con valor de TPDA el 10,78 % de las rutas nacionales primarias, el 15,05 % de las rutas nacionales secundarias y un 42,95 % de las rutas nacionales terciarias. Se excluyeron del estudio aquellas secciones que no tuviesen un valor de TPDA registrado.

El tipo de superficie, condición de señalización y ancho de superficie fueron las características que resultaron ser significativas en los cuatro modelos analizados. Asimismo, la velocidad, tipo de terreno, número de carriles y condición del espaldón son variables significativas en tres de los cuatro modelos, por lo que también se deben de tener en consideración.

La sección de control 10003 es la que se posiciona en primer lugar dentro de la clasificación de las secciones de control identificadas con exceso de frecuencia de choques esperado, tanto en los modelos de choques totales, heridos leves, así como heridos graves y fallecidos. Se señala que las condiciones de la sección de control 10003 corresponden en gran medida a la condición base.

A partir de los análisis realizados, es de esperar que vías con un ancho de superficie mayor presenten una cantidad esperada de la clase de accidentes totales superior respecto a vías con un ancho de superficie menor.

En los modelos generados, la velocidad se presenta como una variable que, a medida que aumenta, disminuye el exceso

de frecuencia de choques esperado. Este resultado es consistente con los resultados de Rodríguez Shum [15]. Se aclara que en investigaciones previas en Costa Rica [16], la velocidad no fue una variable significativa, por ello, no es posible contrastar los resultados. La velocidad no se presenta en categorías de ocurrencia natural, por lo que el proceso de agrupación y asignación a los tramos afecta el resultado de la modelación [20], [21].

El tipo de choque de mayor ocurrencia es colisión con motocicleta con un 41,1 % del total de choques registrados. Por esta razón, se realizó un análisis particular para este tipo de choque.

La variable *Grip* resultó ser una variable no significativa en la mayoría de los modelos analizados.

A partir de los resultados obtenidos, se logra concluir que es posible generar funciones de desempeño de seguridad vial utilizando a la sección de control como unidad de análisis. Esta corresponde a la unidad de agregación mínima empleada por el MOPT para la gestión de la Red Vial Nacional. En este caso en particular, con este proyecto, se logra desagregar los hallazgos de [8]. Adicionalmente, en este trabajo, se consideraron características físicas y operativas de las vías en la generación de los modelos.

Se recomienda en estudios posteriores evaluar las relaciones que pueden existir dentro de las diferentes variables físicas y operativas utilizadas en el modelo. Se sugiere la aplicación de análisis de componentes principales u otra técnica estadística multivariada, lo cual podría permitir simplificar el análisis de variables que pueden intervenir en la ocurrencia de choques viales.

Sería recomendable que la Secretaría de Planificación Sectorial del Ministerio de Obras Públicas y Transportes comience a recopilar y reportar dentro de las estadísticas de tráfico la cantidad de motociclistas con el fin de incorporar esta variable en futuros estudios. Esto especialmente porque dicha variable resultó significativa en los estudios de Ospina-Mateus, Quintana Jiménez, Lopez-Valdés y Sankar Sana [9], así como en Manan, Jonsson y Várhelyi [10].

De igual forma, sería interesante explorar otro tipo de agregaciones de la información, tal como lo realizaron Yuan, Abdel-Aty, Fu, Wu, Yue y Eluru [22], ya que las condiciones operativas de la vía varían también de manera temporal, por ejemplo. O bien, desagregar la información de acuerdo con las condiciones del tiempo, tal como lo hicieron Das, Geedipally y Fitzpatrick [23]. Además, es recomendable realizar futuros estudios enfocados en otros usuarios vulnerables, como los ciclistas [24] o peatones [25]. Por tanto, se recomienda realizar un estudio para determinar ubicaciones con potencial de mejora utilizando funciones de desempeño de seguridad vial, aplicado a las intersecciones de la Red Vial Nacional de Costa Rica, a usuarios vulnerables como peatones o ciclistas, o bien, un análisis con un nivel de segregación por kilómetro de la RVN, por condición del tiempo o utilizando diferentes periodos temporales. Asimismo, estos estudios pueden considerar el tipo de vía y el contexto de la vialidad en la cual se enmarcan, según las limitaciones de los futuros estudios.

ROLES DE LAS PERSONAS AUTORAS

Rodolfo Fernández Garita: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Adquisición de fondos, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Recursos, Software, Validación, Visualización, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Henry Hernández Vega: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Recursos, Software, Supervisión, Validación, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Jonathan Agüero Valverde: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Software, Supervisión, Redacción – borrador original.

Diana Jiménez Romero: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Supervisión, Redacción – borrador original.

REFERENCIAS

- [1] Unidad de Estadísticas Demográficas, *Estadísticas Vitales 2017 POBLACIÓN, NACIMIENTOS DEFUNCIONES Y MATRIMONIOS*. San José, Costa Rica: INEC, 2018.
- [2] Unidad de Estadísticas Demográficas, *Estadísticas Vitales 2019 POBLACIÓN, NACIMIENTOS DEFUNCIONES Y MATRIMONIOS*. San José, Costa Rica: INEC, 2020.
- [3] Unidad de Estadísticas Demográficas, *Estadísticas Vitales 2021 POBLACIÓN, NACIMIENTOS DEFUNCIONES Y MATRIMONIOS*. San José, Costa Rica: INEC, 2022.
- [4] AASHTO, *Highway Safety Manual*, 1 ed. Washington D.C., Estados Unidos: AASHTO, 2010.
- [5] V. G. Valencia-Alaix, B. Restrepo Betancur, C. Lizarazo Jimenez y R. A. Pineda Mendez, “Estimation of Safety Performance Functions (SPF) at signalized intersections in Medellín Colombia”, *Dyna*, vol. 87, no. 214, pp. 215–220, jul. 2020, doi: 10.15446/dyna.v87n214.83880.
- [6] R. Guadamuz-Flores y J. Agüero-Valverde, “Cruces ferroviarios con promesa de mejora en seguridad vial en Costa Rica”, *Infraestructura Vial*, vol. 21, no. 38, pp. 1–8, 2019, doi: 10.15517/iv.v21i38.38280.
- [7] J. A. García, C. G. Lizarazo, S. C. Mangones, L. A. Bulla-Cruz y E. Darghan, “Safety performance of dedicated and preferential bus lanes using multivariate negative binomial models for Bogotá, Colombia”, *Accid. Anal. Prev.*, vol. 202, p. 107595, jul. 2024, doi: 10.1016/j.aap.2024.107595.
- [8] J. Agüero-Valverde, “Determinación de rutas con potencial de mejora utilizando funciones de desempeño de seguridad vial: caso de Costa Rica”, *Infraestructura Vial*, vol. 18, no. 32, pp. 39–52, dic. 2016, doi: 10.15517/iv.v18i32.29783.
- [9] H. Ospina-Mateus, L. A. Quintana Jiménez, F. J. Lopez-Valdez y S. Sankar Sana, “Prediction of motorcyclist traffic crashes in Cartagena (Colombia): development of a safety performance function”, *RAIRO-Operations Research*, vol. 55, no. 3, pp. 1257–1278, abr. 2021, doi: 10.1051/ro/2021055.
- [10] M. M. A. Manan, T. Jonsson y A. Várhelyi, “Development of a safety performance function for motorcycle accident fatalities on Malaysian primary roads”, *Saf. Sci.*, vol. 60, pp. 13–20, dic. 2013, doi: 10.1016/j.ssci.2013.06.005.
- [11] COSEVI, “Costa Rica: Longitud de la red vial”. <https://datosabiertos.csv.go.cr/dataviews/234872/costa-rica-longitud-de-la-red-vial/> (accesado en 25 may., 2023).
- [12] V. Varela Araya y J. Agüero-Valverde, “Modelos de frecuencia de choques para segmentos de intersecciones: ruta 34 en Costa Rica”, *Ingeniería*, vol. 28, no. 1, pp. 41–59, oct. 2018, doi: 10.15517/ri.v28i1.31071.
- [13] E. A. Castro Estrada y J. Agüero-Valverde, “Aplicación del método Bayes Empírico en análisis de seguridad vial: el caso de la Ruta 32 en Costa Rica”, *Ingeniería*, vol. 25, no. 1, pp. 33–46, feb. 2015, doi: 10.15517/ri.v25i1.17304.
- [14] L. M. Moya Fernández, “Análisis de choques en la ruta 27 usando modelos multivariados”, Tesis de Maestría, Universidad de Costa Rica, San Pedro, Costa Rica, 2019.
- [15] S. Rodríguez Shum, “Análisis de sitios de concentración de choques viales mediante la utilización de sistemas móviles para el inventario de carreteras en la Ruta Nacional 1”, Tesis de Maestría, Universidad de Costa Rica, San Pedro, Costa Rica, 2019.
- [16] V. Varela Araya, “Análisis de sitios de concentración de choques viales en la Ruta Nacional 34 utilizando el método de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes empírico”, Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica, San Pedro, Costa Rica, 2016.
- [17] M. A. Leiva López, “Análisis de sitios de concentración de choques viales en la Ruta Nacional 2, mediante el método de exceso de frecuencia de choques esperado”, Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica, San Pedro, Costa Rica, 2016.
- [18] E. A. Castro Estrada, “Análisis de tramos de concentración de choques viales en la Ruta Nacional 32, utilizando el Método de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes empírico”, Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica, San Pedro, Costa Rica, 2013.
- [19] Secretaría de Planificación Sectorial, “Trazado Red Vial Nacional”. Sistema Nacional de Información Territorial. https://www.sniter.go.cr/ico_servicios_ogc_info?k=bm9k-bzo6MTIx&nombre=MOPT%20-%20Secretar%C3%A-Da%20de%20Planificaci%C3%B3n%20Sectorial (accesado en 25 may., 2023).

- [20] E. Hauer, “Even correctly specified and well-estimated regression models can mislead”, *Accid. Anal. Prev.*, vol. 194, p. 107239, ene. 2024, doi: 10.1016/j.aap.2023.107239.
- [21] R. Elvik, P. Christensen y A. Helene Amundsen, *Speed and road accidents an evaluation of the power model*. Oslo, Noruega: Transportøkonomisk Institutt, 2004.
- [22] J. Yuan, M. Abdel-Aty, J. Fu, Y. Wu, L. Yue y N. Eluru, “Developing safety performance functions for freeways at different aggregation levels using multi-state microscopic traffic detector data”, *Accid. Anal. Prev.*, vol. 151, p. 105984, mar. 2021, doi: 10.1016/j.aap.2021.105984.
- [23] S. Das, S. R. Geedipally y K. Fitzpatrick, “Inclusion of speed and weather measures in safety performance functions for rural roadways”, *LATSS research*, vol. 45, no. 1, pp. 60–69, abr. 2021, doi: 10.1016/j.iatssr.2020.05.001.
- [24] N. Shirani-Bidabadi, M. Anderson, N. Mallipaddi y K. Hal-eem, “Developing Bicycle-Vehicle Crash-Specific Safety Performance Functions in Alabama Using Different Techniques”, *Accid. Anal. Prev.*, vol. 146, p. 105735, oct. 2020, doi: 10.1016/j.aap.2020.105735.
- [25] G. Zhai, K. Xie, D. Yang y H. Yang, “Developing equity-aware safety performance functions for identifying hotspots of pedestrian-involved crashes”, *Accid. Anal. Prev.*, vol. 207, p. 107759, nov. 2024, doi: 10.1016/j.aap.2024.107759.