

## **Modelos de frecuencia de choques para segmentos de intersecciones: ruta 34 en Costa Rica**

### **Crash Frequency Models for Segments and Intersections: Route 34 in Costa Rica**

*Viviana Varela Araya*  
*Investigación y Estadística en Dirección de Proyectos del*  
*Consejo de Seguridad Vial, San José, Costa Rica*  
*vvarela@csv.go.cr*

*Jonathan Agüero-Valverde*  
*Programa de Investigación Desarrollo Urbano Sostenible, Universidad de Costa Rica*  
*jonathan.aguero@ucr.ac.cr*

**Recibido:** 14 de octubre 2017

**Aceptado:** 23 de octubre 2017

---

#### **RESUMEN**

La Ruta Nacional 34 tiene una gran relevancia tanto a nivel nacional como internacional, pues permite atravesar Costa Rica de frontera a frontera, sin ingresar a la zona metropolitana. A diferencia de estudios previos, por primera vez para un corredor en Costa Rica se realizaron modelos tanto para segmentos como para intersecciones simultáneamente. Se estudiaron los 16 segmentos y 11 intersecciones con mayor exceso de frecuencia de choques.

El proceso de gestión de seguridad vial que se utilizó es el recomendado por el Highway Safety Manual del 2010, del cual se desarrollaron los primeros tres pasos: evaluación de la red, diagnóstico y selección de contramedidas. Para realizar el análisis se utilizó el método de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes empírico, debido a que se distingue de otros métodos por su precisión al considerar la disponibilidad de datos, el sesgo de regresión a la media y cómo se establece el umbral de desempeño.

Una de las principales problemáticas encontradas en esta carretera es la falta de facilidades para peatones y ciclistas, problemas con la gestión de accesos, anchos de espaldón, velocidad y diseño de intersecciones.

#### *Palabras clave:*

Análisis de sitios de concentración de choques, método de Bayes Empírico, regresión binomial negativa, Ruta 34, Costa Rica.

#### **ABSTRACT**

The National Route 34 has a great relevance at national and international level because it allows crossing Costa Rica from border to border, without entering at the metropolitan area. Unlike previous studies, for the first time for a corridor in Costa Rica, models were made for segments



and intersections simultaneously. This project includes countermeasures for the 16 segments and 11 intersections with greater expected crash frequency.

The roadway safety management process indicated in the 2010 Highway Safety Manual was used in this investigation. The first three steps of the process were developed: network screening, diagnosis and selection of countermeasures. To perform the analysis, the method of expected crash frequency with empirical Bayes adjustment was used because the accuracy differs from other methods that considered data availability, regression-to-the-mean bias, and how the performance threshold is established.

One of the main problems found on this road is the absence of facilities for pedestrians and cyclists as well as problems with access management, shoulder width, speed and design of intersections.

*Keywords:*

Analysis of crashes' sites, Empirical Bayes method, negative binomial regression, Route 34, Costa Rica.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los choques viales representan una de las principales causas de muerte a nivel mundial. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (2015), cerca de 1,25 millones de personas mueren cada año en el mundo como resultado de accidentes de tránsito, y entre 20 y 50 millones más sufren lesiones no mortales, de las cuales muchas dejan como consecuencia una discapacidad física en los afectados. Además, este tipo de accidentes representan la principal causa de muerte en personas con edades entre 15 y 29 años. Por otra parte, la mitad de las personas que mueren en las carreteras del mundo son usuarios vulnerables en la vía, es decir, peatones, ciclistas y motociclistas (OMS, 2015).

En Costa Rica, de acuerdo con el Panorama Demográfico año 2013 del Instituto Costarricense de Estadística y Censos (INEC), las muertes por accidentes de tránsito se encuentran entre las primeras tres causas de muerte. Los años de vida potencialmente perdidos (AVPP) corresponden a un indicador que permite analizar la mortalidad prematura; se refiere al número de años que teóricamente la persona deja de vivir cuando muere antes de lo esperado, lo que permite dar mayor importancia a las muertes que ocurren en edades tempranas, muchas de las cuales pueden ser evitables (INEC, 2013). Considerando lo anteriormente descrito, la causa de muerte que generó más años AVPP en Costa Rica para el año 2013 fue lesiones en accidente de tránsito, de vehículo de motor no especificado, es decir, causas prevenibles (INEC, 2013). Además, según estadísticas del Consejo de Seguridad Vial (COSEVI) del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) para el año 2015, el 68% de las muertes en sitio en accidentes de tránsito fueron de usuarios vulnerables.

Aunado a esto, los choques viales causan considerables pérdidas económicas en las víctimas, sus familias y el país. Sánchez, Agüero-Valverde y Pujol (2015) en su estudio “Costos de los choques viales en Costa Rica” indican que los costos directos de los choques viales en Costa Rica ascienden a 55 mil millones de colones anuales, lo cual equivale a un 2,5% del Producto Interno Bruto (PIB) del país. Por su parte, los costos por AVPP alcanzan 16 mil millones de colones anuales, es decir, un 0,91% del PIB. Y los costos por demora corresponden a un 6% del PIB, equivalentes a 120 mil millones de colones anuales.

La Ruta Nacional 34, Costanera Sur o Carretera Pacífica Fernández Oreamuno, representa una de las rutas más importantes del país, pues forma parte de un corredor que permite atravesar Costa Rica de frontera a frontera sin ingresar a la zona metropolitana. Además, esta carretera se incluye en una iniciativa de integración vial internacional del Plan Puebla-Panamá, hoy conocida como Proyecto Mesoamérica, planteada por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2001, que pretende aumentar la conectividad interna y externa de las economías de la región y unificar los servicios de transporte por carretera, aéreo y marítimo; por tanto, su correcto funcionamiento influye directamente en la economía del país y de la región. Sin embargo, los pocos estudios realizados sobre la seguridad vial de esta carretera reflejan graves problemas de diseño, de vulnerabilidad física ante amenazas naturales y de medidas de seguridad vial.

Uno de los principales problemas que se da en esta carretera es que durante años varios tramos estuvieron funcionando con una superficie de ruedo de tierra y grava,

lo que hizo que las poblaciones circundantes se desarrollaran bajo estas condiciones. Al darse la transformación hacia una carretera de alta velocidad y tránsito pesado, las condiciones cambiaron, lo cual implicó un proceso de adaptación de la dinámica de las poblaciones vecinas a la carretera. Estas circunstancias provocaron que los centros poblacionales más importantes se desarrollaran muy cerca de la carretera, lo que genera muchos flujos entrando y saliendo de la vía, así como poco espacio para la ampliación de espaldones. Por otro lado, en algunos segmentos de un lado de la vía existe una zona residencial, y del otro, una zona comercial, lo que provoca que los peatones tengan que estar cruzando constantemente la carretera.

Según una auditoría externa, realizada por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR) (Unidad de Auditorías Técnicas LanammeUCR-PITRA, 2010), en el segmento Quepos-Barú en 2010, se observaron problemas en los diseños de los sistemas de contención vehicular utilizados, inadecuada colocación de las barreras de seguridad; mal empleo de las terminales de las barreras; colocación de barreras de seguridad inadecuadas en puentes; facilidades para los ciclistas y para los peatones insuficientes en algunos tramos; intersecciones y accesos directos a la vía sin un adecuado control y condiciones de operación; e inconsistencias en la señalización horizontal y vertical. Posteriormente, en el año 2011, el LanammeUCR presentó el informe del proyecto “Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica: Identificación de zonas de riesgo de accidentes Rutas 1, 2, 32 y 34” (Unidad de Evaluación de la Red Vial Nacional LanammeUCR-PITRA, 2011), en donde se consideraron variables como el tipo de terreno, alineamiento, distribución de días de lluvia, precipitación promedio anual, retroreflectividad y agarre superficial y, tomando en cuenta todos estos factores, se obtuvo para la Ruta 34 la siguiente escala de susceptibilidad a la ocurrencia de choques: muy baja de 5,35%, baja de 19,47%, regular de 36,24%, alta de 21,43% y muy alta de 17,51%. Adicional a estos dos estudios, previo a este trabajo no existen más investigaciones sobre la seguridad vial de esta carretera.

La frecuencia y severidad de los choques observadas en los últimos años en la Ruta Nacional 34, la ausencia de estudios detallados sobre sus causas y la falta de información sobre el tema, evidencian la importancia de realizar un análisis de al menos los sitios más críticos de concentración de choques viales, de manera que se puedan proponer medidas que brinden soluciones a la problemática actual y a largo plazo.

Por otra parte, el método de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes empírico es un método relativamente reciente (publicado en 2010), incluido en el Manual de Seguridad de Carreteras de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2010). Para el año 2016, este método ya se ha aplicado en tres carreteras de Costa Rica: la Ruta Nacional 32, la Ruta Nacional 2 y la Ruta Nacional 34, por lo que este trabajo incluye, además, una comparación entre los resultados obtenidos en estas tres investigaciones. Es importante considerar que, tanto en esta investigación como en la realizada en la Ruta Nacional 2, se analizaron dos tipos de sitios: segmentos e intersecciones, lo cual no sucede en el estudio realizado en la Ruta Nacional 32, y representa una diferencia importante en los resultados obtenidos.

## 2. METODOLOGÍA

Existe una gran variedad de métodos de medición de desempeño que pueden ser utilizados para evaluar el potencial de reducción de choques en un sitio. Las consideraciones clave en la selección del método de medición de desempeño son: la disponibilidad de datos, el sesgo de regresión a la media, y cómo se establece el umbral de desempeño. Para esta investigación se eligió el método de exceso de frecuencia de choques esperados con ajuste de Bayes empírico, pues toma en cuenta estas consideraciones y además es un método preciso y confiable.

Para poder aplicar el método de Bayes empírico, primeramente se deben determinar las funciones de desempeño de seguridad vial, las cuales son ecuaciones de regresión que estiman la frecuencia media de choques para un tipo de sitio específico (con condiciones base especificadas). Para obtener estas funciones se analizan modelos que indiquen, de acuerdo con las características de la carretera, cuáles variables pueden tener una mayor incidencia en los choques y con esto determinar cuáles sitios de la carretera presentan exceso de frecuencia de choques con respecto al valor esperado.

Según Castro y Agüero-Valverde (2014) si se considera cada viaje como un evento con una probabilidad muy baja de terminar en un choque y se asocian esos viajes a un tiempo y un sitio de la carretera determinados, el número de choques observados tendrá una distribución de Poisson. Sin embargo, los choques viales presentan más dispersión de la que una distribución de Poisson puede explicar, pues en este tipo de distribución la varianza está restringida a ser igual que el promedio. La distribución binomial negativa no presenta este inconveniente, debido a que se basa en la distribución de Poisson pero permite que la varianza sea mayor que el promedio (Agüero-Valverde y Jovanis, 2006).

Para calcular la frecuencia de choques promedio prevista ( $N_{pred}$ ), se deben considerar las funciones de desempeño de seguridad obtenidas de la regresión binomial negativa. Considerando esto, la función de desempeño para segmentos toma la siguiente forma:

$$\ln(\text{choques}) = \beta_0 + \beta_1 * \ln(\text{TPDA}) + \beta_2 * \text{variable 2} + \beta_3 * \text{variable 3} + \dots + \beta_n * \text{variable n} + \ln(\text{Longitud}) \quad (1)$$

Donde,  $\beta_0$  corresponde a la constante,  $\beta_1$  es el coeficiente asociado al Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA) y  $\beta_{1,2,\dots,n}$  son los coeficientes asociados a las variables 1, 2, ..., n. Todos estos coeficientes son obtenidos del modelo. Las variables 1, 2, ..., n van a ser las variables que una vez modeladas hayan dado resultados significativos para el modelo.

Para el caso de las intersecciones, no se incluye la variable longitud y el TPDA de la vía secundaria debería ser incorporado; sin embargo, como no se cuenta con esta información, la categoría de la carretera secundaria es utilizada como aproximación del volumen de la vía principal.

Despejando se obtiene:

$$N_{pred} = e^{\beta_0} * TPDA^{\beta_1} * e^{(\beta_2 * variable\ 2)} * e^{(\beta_3 * variable\ 3)} * \dots * e^{(\beta_n * variable\ n)} * Longitud \quad (2)$$

El ajuste por peso se refiere a la confiabilidad de la función de desempeño de seguridad que se utilice y se obtiene de la siguiente relación:

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

Donde,  $k$  es el parámetro de sobredispersión de la función de desempeño de seguridad, en este caso  $1/\theta$ , siendo  $\theta$  obtenido de la regresión. Si los parámetros de sobredispersión son bajos, hay mayor confiabilidad, lo que implica que el ajuste por peso va a ser más grande y, a su vez, que la función de desempeño es más confiable.

Para calcular la frecuencia de choques esperados total se utiliza la ecuación:

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

Donde,  $N_{obs}$  corresponde al número de choques observado.

El exceso de frecuencia de choques esperados se obtiene de la diferencia entre los choques estimados con el ajuste de Bayes empírico y los estimados predichos, tal y como se muestra en la siguiente relación:

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

De esta manera se puede determinar cuáles sitios tienen una frecuencia de choques mayor a la esperada.

Adicional al estudio de choques totales, se analizó el caso de choques equivalentes a solo daños materiales. El concepto de equivalencia se utiliza para comparar distintas severidades de choque en términos económicos. La manera de comparar las diferentes severidades con los choques con solo daños materiales es mediante pesos de acuerdo al costo en que incurra cada gravedad. Para realizar este proceso de comparación entre distintas severidades de choque en la carretera estudiada no existe información, por lo que se tuvo que buscar factores de equivalencia de lugares con características similares al sitio de estudio. Según Castro (2013), un estudio realizado en la zona de Campeche

en México es el que más se asemeja a las características de la Ruta Nacional 32. Por su parte, las características del tránsito, uso y tipo de carretera de la Ruta Nacional 32 son comparables en gran medida con las características de la Ruta Nacional 34, por lo que se decidió utilizar los mismos pesos que Castro. Los pesos que se utilizaron para calcular los choques equivalentes a solo daños materiales fueron: un choque con víctimas mortales equivalente a cuarenta choques con solo daños materiales, un choque con heridos graves equivalente a doce choques con solo daños materiales, y un choque con heridos leves equivalente a tres choques con solo daños materiales.

Las medidas de mitigación propuestas para los sitios críticos se obtuvieron realizando un diagnóstico detallado de cada sitio seleccionado, mediante observaciones realizadas en las giras de campo y de la información obtenida de la revisión bibliográfica, tanto de documentos elaborados en el país como de medidas implementadas y recomendadas a nivel nacional e internacional.

### **3. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS**

#### **3.1 Datos de los choques**

Los datos de los choques se obtuvieron de la información proporcionada por el COSEVI para el período 2011-2013. Esta sección presenta a manera de estadística descriptiva las condiciones de los 1 032 choques reportados en esos 3 años.

Con respecto a la severidad, los choques se agruparon en cuatro grupos: muerte, herido grave, herido leve y solo daños materiales. En la categoría solo daños materiales, se incluyeron tanto los choques con ilesos como los choques con lesión ignorada, debido a que es lo mínimo que pudo haber sucedido en estos accidentes sin información. Para el período estudiado resultaron 1 708 involucrados con solo daños materiales, 361 heridos leves, 102 heridos graves y 23 muertos.

En relación con el rol de las personas involucradas en los choques, se obtuvo que el rol predominante fue el de conductor, lo cual es esperable pues en todos los casos de choques viales tiene que haber al menos un conductor involucrado. Los roles de pasajero de automóvil, motociclista y peatón son los siguientes más reportados.

#### **3.2 Datos de los sitios**

Los datos de los sitios se obtuvieron de la información de la Red Vial Nacional obtenida del Departamento de Planificación Sectorial del MOPT, así como de la información recopilada en las visitas al sitio.

Con respecto a los sitios analizados, de los 18 segmentos originales del Inventario de la Red Vial Nacional equivalentes a los aproximadamente 203 km de carretera, se obtuvieron 171 segmentos homogéneos con longitudes entre 500 m y 200 m, divididos utilizando los siguientes criterios: número de carriles, tipo de zona y alineamiento horizontal. Por otra parte, en total se determinaron 162 intersecciones a lo largo de la carretera.

Además, el 70,8% de los sitios en los que se sucedieron choques fueron segmentos y el 29,2% intersecciones.

### 3.3 Estadísticas descriptivas

Se realizó además un análisis de las estadísticas de los segmentos y las intersecciones para las diferentes severidades de choque. La tabla 1 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 1. Estadísticas descriptivas para cada severidad de choque en segmentos e intersecciones.

Sitio	Valor	Choques fatales	Choques heridos graves	Choques heridos leves	Choques solo daños materiales	Total de choques
Segmentos	Mínimo	0	0	0	0	0
	Primer cuartil	0	0	0	1	1
	Mediana	0	0	0	2	3
	Promedio	0,04	0,15	0,64	3,45	4,27
	Tercer cuartil	0	0	1	5	5,5
	Máximo	2	2	4	26	29
	Desviación Estándar	0,24	0,37	0,90	4,31	4,74
Intersecciones	Mínimo	0	0	0	0	0
	Primer cuartil	0	0	0	0	0
	Mediana	0	0	0	0	1
	Promedio	0,01	0,02	0,18	1,64	1,85
	Tercer cuartil	0	0	0	2	2
	Máximo	1	1	3	32	34
	Desviación Estándar	0,11	0,16	0,48	3,49	3,75

Adicionalmente, se calcularon las estadísticas descriptivas para las variables continuas que se utilizaron en el modelo. Estas son:

- Longitud del segmento: se refiere a la longitud de los segmentos homogéneos.
- Densidad de accesos: se obtuvo del cociente entre el número de accesos por segmento (salidas o entradas de la carretera hacia calles paralelas, intersecciones o entradas privadas) y la longitud del segmento.
- Número de carriles: para la configuración de esta carretera el número de carriles varía entre 2 y 4.



- TPDA: se refiere al volumen de tráfico de cada segmento. Se tienen 17 estaciones de control para esta ruta. El TPDA asignado a cada choque corresponde a la suma del TPDA de la sección en la cual se haya ubicado el choque para los tres años. Se realizó de esta manera debido a que se cuenta con muy pocos datos en cada tramo, por lo que la probabilidad de obtener errores utilizando el TPDA de cada año es mayor.
- Velocidad: corresponde al límite de velocidad establecido para cada segmento. En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 2. Estadísticas descriptivas de las variables continuas en segmentos.

	Longitud (km)	Densidad de accesos	Número de carriles	TPDA	Velocidad (km/h)
Mínimo	0,00	0,00	2,00	6 408	60,00
Primer cuartil	0,00	0,98	2,00	11 249	75,00
Mediana	0,01	2,05	2,00	18 229	80,00
Promedio	0,01	2,61	2,17	18 692	76,35
Tercer cuartil	0,01	3,50	2,00	18 964	80,00
Máximo	0,10	12,17	4,00	50 518	80,00
Desviación Estándar	0,01	2,33	0,46	10 2923	6,02

En todos los casos, el promedio es mayor que la mediana, con excepción de la variable límite de velocidad, pues no se da una tendencia definida.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Modelo binomial negativo: Funciones de desempeño de seguridad vial

Como ya se mencionó, el análisis de los segmentos e intersecciones se realizó por aparte. Por tanto, para los segmentos se construyó una base con los 171 tramos y las variables asociadas a cada uno, y de igual manera se elaboró una tabla con las 162 intersecciones y sus variables.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los tres modelos seleccionados. Para segmentos, solo se incluye el modelo de choques totales, porque el modelo de choques equivalentes no resultó significativo. Los coeficientes asociados al modelo de choques totales en segmentos se muestran en la tabla 3.

Como se puede ver, las variables que resultaron estadísticamente significativas fueron el TPDA, la densidad de accesos, segmentos de carretera con tres carriles y el tipo de zona urbana. Para la variable número de carriles, la categoría base fue segmentos con dos

carriles, y para la variable tipo de zona, la variable base fue tipo de zona rural. Además, es importante resaltar que, como se puede observar en la tabla 3, todos los coeficientes asociados a estas variables resultaron positivos, lo cual quiere decir que tienen una relación directa con la ocurrencia de choques. Los resultados del modelo son consistentes con estudios previos que muestran un incremento de los choques con el tráfico, la densidad de accesos, segmentos con carril de ascenso (3 carriles) y en zonas urbanas.

Tabla 3. Resultado de la regresión binomial negativa para total de choques en segmentos.

Parámetro	Variable	Estimación	Error Estándar	Valor de z	Pr ( $z >  z $ )	Significancia
$\beta_0$	Intercepto	-4,663	1,316	-3,543	0,40e-03	***
$\beta_1$	Ln(TPDA)	0,549	0,138	3,986	6,71e-05	***
	Densidad de					
$\beta_2$	accesos	0,090	0,032	2,798	0,005	**
$\beta_3$	3 Carriles	0,494	0,202	2,441	0,015	*
$\beta_4$	4 carriles	0,538	0,388	1,388	0,165	
$\beta_5$	Zona Urbana	0,681	0,155	4,381	1,18e-05	***

Códigos de significancia: 0 \*\*\*\* 0,001 \*\*\* 0,01 \*\* 0,05 \* 0,1 ' ' 1 (Para Binomial Negativo el parámetro de dispersión (2,6514) se toma como 1)

Desviación nula: 313,85 en 170 grados de libertad

Desviación residual: 184,13 en 165 grados de libertad

AIC: 810,14

Número de interacciones de Fisher: 1.

Theta: 2,651.

Error estándar: 0,499

2 x log-likelihood: -796,135

Para intersecciones, los coeficientes obtenidos en el modelo de choques totales y en el modelo de choques equivalentes a solo daños materiales se muestran en las tablas 4 y 5, respectivamente.

Para ambos modelos, las variables significativas fueron el TPDA de la vía primaria y las intersecciones tipo T, donde el TPDA tiene una relación directa con la ocurrencia de choques y las intersecciones tipo T una relación inversa. Las calles secundarias cantonales resultaron marginalmente significativas ( $p = 0.102$ ) en comparación con carreteras secundarias nacionales.

Estos resultados son consistentes con literatura que muestra que el riesgo de choque aumenta con la exposición vehicular. Además, se conoce que las intersecciones tipo T son más seguras que las intersecciones en cruz.

Para ambos modelos, las variables significativas fueron el TPDA de la vía primaria y las intersecciones tipo T, donde el TPDA tiene una relación directa con la ocurrencia de choques y las intersecciones tipo T una relación inversa. Las calles secundarias

cantoniales resultaron marginalmente significativas ( $p = 0.102$ ) en comparación con carreteras secundarias nacionales.

Tabla 4. Resultado de la regresión binomial negativa para choques totales en intersecciones.

Parámetro	Variable	Estimación	Error Estándar	Valor de z	Pr	Significancia
$\beta_0$	Intercepto	-4,564	2,600	-1,755	0,079	
$\beta_1$	TPDA Primaria	0,700	0,266	2,631	0,009	**
$\beta_2$	Tipo secundaria cantonal	-0,801	0,489	-1,637	0,102	
$\beta_3$	Tipo intersección "otras"	-0,152	0,714	-0,213	0,831	
$\beta_4$	Tipo de intersección T	-1,403	0,313	-4,485	7,27e-06	***

Códigos de significancia: 0 '\*\*\*' 0,001 '\*\*\*' 0,01 '\*\*' 0,05 '.' 0,1 '.' 1  
 (Para Binomial Negativo el parámetro de dispersión (0,8146) se toma como 1)  
 Desviación nula: 222,38 en 161 grados de libertad  
 Desviación residual: 163,21 en 157 grados de libertad  
 AIC: 542,01  
 Número de interacciones de Fisher: 1  
 Theta: 0,815  
 Error estándar: 0,182  
 2 x log-likelihood: -530,005

Tabla 5. Resultado de la regresión binomial negativa para choques equivalentes a solo daños materiales en intersecciones.

Parámetro	Variable	Estimación	Error Estándar	Valor de z	Pr	Significancia
$\beta_0$	Intercepto	-7,1295	3,127	-2,280	0,023	*
$\beta_1$	TPDA Primaria	0,9969	0,319	3,126	0,002	**
$\beta_2$	Tipo secundaria cantonal	-0,7861	0,638	-1,232	0,218	
$\beta_3$	Tipo intersección "otras"	-0,4408	0,954	-0,462	0,644	
$\beta_4$	Tipo de intersección T	-1,2551	0,403	-3,111	0,002	**

Códigos de significancia: 0 '\*\*\*' 0,001 '\*\*\*' 0,01 '\*\*' 0,05 '.' 0,1 '.' 1  
 (Para Binomial Negativo el parámetro de dispersión (0,4261) se toma como 1)  
 Desviación nula: 193,97 en 161 grados de libertad  
 Desviación residual: 154,95 en 157 grados de libertad  
 AIC: 632,06  
 Número de interacciones de Fisher: 1  
 Theta: 0,4261  
 Error estándar: 0,0715  
 2 x log-likelihood: -620,0590

Estos resultados son consistentes con literatura que muestra que el riesgo de choque aumenta con la exposición vehicular. Además, se conoce que las intersecciones tipo T son más seguras que las intersecciones en cruz.

#### **4.2 Método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes empírico**

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, el objetivo del análisis estadístico es encontrar los sitios con mayor exceso de frecuencia de choques esperado con respecto a sitios similares. Según Hauer (1996), la tarea consiste en tamizar a través de una multitud de sitios con el fin de identificar un subconjunto relativamente pequeño para averiguar cómo puede y debe ser mejorada su seguridad.

Para seleccionar los sitios que se van a analizar, se recomienda elegir entre el 5% y el 10% de los segmentos y las intersecciones totales. De las 162 intersecciones se seleccionaron 11, equivalente a aproximadamente un 7%; y de los 171 segmentos, se eligieron 16, correspondiente a aproximadamente un 9%.

Los resultados obtenidos para los sitios más críticos se resumen en las tablas 6 y 7, donde  $\Delta$  corresponde al exceso de frecuencia de choques esperada.

Como ya se mencionó, para los segmentos solo se obtuvo un modelo para los choques totales, por lo que los 16 segmentos elegidos corresponden a los 15 primeros segmentos ordenados por el método de clasificación simple y, adicionalmente, se seleccionó el segmento 69, a pesar de estar en la posición 39 del *ranking*, pues cuenta con un registro de 2 choques fatales, 2 choques con heridos leves y 9 choques con solo daños materiales.

En el caso de las intersecciones, como se obtuvieron dos modelos, se siguió la recomendación dada por el *Highway Safety Manual* referente a seleccionar los sitios que aparecen repetidamente en el extremo superior de la lista al aplicar múltiples medidas de desempeño para el mismo conjunto de datos (AASHTO, 2010). Como se puede ver, en las primeras 15 posiciones de la lista para ambos modelos, se repiten 10 intersecciones; estas son las intersecciones resaltadas en color. Aparte de estas 10 intersecciones se incluyó el cruce La Vaquita (ID: 14), ubicada en el *ranking* 2 de la lista de choques equivalentes a solo daños materiales, pues registra una muerte y seis choques de solo daños materiales.

A continuación, se muestra el mapa de exceso de choques equivalentes para intersecciones, donde se puede observar que los distritos que presentan mayor cantidad de sitios con concentración de choques son: Tárcoles, Jacó, Parrita y Quepos. Además, es importante resaltar que la mayoría de intersecciones críticas se encuentran cerca o dentro de un segmento crítico.

Por otra parte, como se ha venido mencionando a lo largo del artículo, estos sitios se caracterizan por tener volúmenes de tráfico altos, se ubican en zonas urbanas, las cuales presentan una alta densidad de accesos y además muchas de estas intersecciones corresponden a la configuración tipo cruz.

Los mapas de choques totales para segmentos e intersecciones se pueden consultar en el Trabajo Final de Graduación “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” (Varela, 2016).

Tabla 6. Segmentos con mayor exceso de frecuencia de choques esperados.

ID segmento	$\Delta$
72: Parrita Centro	15,94
44: Jacó, por el colegio	13,17
33: Villa Caletas, Tárcoles	13,04
34: Mantas, Tárcoles	6,31
36: Herradura centro	6,31
47: Salida de Jacó	6,07
86: Paquita, Quepos	4,77
16: Puente sobre el río Tárcoles	4,58
28: Pita, Tárcoles	4,01
92: La Managua, Quepos	3,46
71: El INVU, Parrita	2,49
5: Frente gasolinera La Puesta del Sol, Coyolar	2,28
112: Portalón, Savegre	2,17
32: Punta Leona, Tárcoles	2,16
17: Después del puente sobre río Tárcoles	2,14

Tabla 7. Intersecciones con mayor exceso de frecuencia de choques esperados.

Choques totales		Choques equivalentes a solo daños materiales	
ID intersección	$\Delta$	ID intersección	$\Delta$
12	24,31	34	41,35
4	10,55	14	34,32
13	6,18	12	26,53
31	4,95	60	12,32
34	3,58	4	11,68
60	2,83	65	10,37
40	2,25	36	9,06
58	2,25	82	5,36
55	2,24	74	5
63	2,24	13	4,14
50	2,13	47	3,83
82	1,92	31	3,61
74	1,67	51	2,81
65	1,57	50	2,79
1	1,42	35	2,55

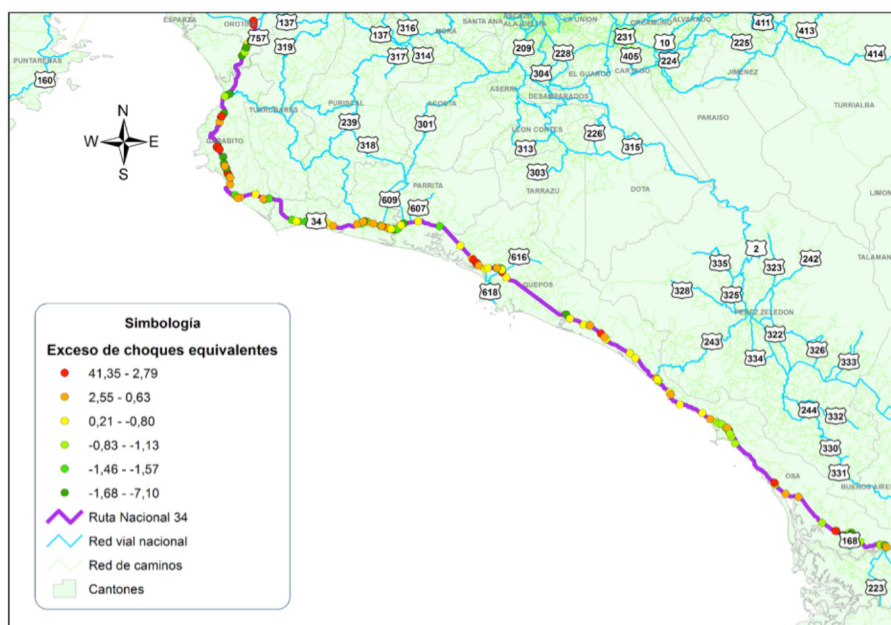


Figura 1. Mapa de exceso de choques equivalente en intersecciones. Elaborado a partir de: MOPT, 2011 y Cosevi, 2017.

### 4.3 Comparación de los resultados obtenidos en las rutas nacionales 34, 32 y 2

Adicionalmente, se incluye la comparación entre los resultados obtenidos en las tres rutas del país en las cuales se ha aplicado el método utilizado en este estudio. Los resultados se resumen en las tablas 9, 10 y 11, donde PD se refiere al parámetro de dispersión.

Como se puede ver, el TPDA resultó significativo en las rutas 32 y 34, la densidad de accesos resultó significativa en los tres modelos, y las variables asociadas al número de carriles también fueron significativas en los tres modelos. Además, los valores de los coeficientes resultaron muy similares en todos los modelos. En el caso del TPDA los valores varían entre 0,549 y 0,476, y para la densidad de accesos varían entre 0,090, 0,082 y 0,108.

En este caso solo se comparan los resultados de las rutas nacionales 34 y 2 debido a que, como se indicó, en el estudio de la Ruta Nacional 32 solo se analizaron segmentos. Se puede ver cómo en este caso todos los coeficientes dieron negativo en el modelo de choques totales, y variaron entre positivo y negativo en el caso de choques equivalentes a solo daños materiales. Además, se puede observar que la única variable comparable fue la de vía secundaria cantonal con valores muy cercanos de  $-0,786$  y  $-0,790$ . En ambos casos, cuando la vía secundaria es cantonal se esperan menos choques que cuando la vía secundaria es nacional.

Tabla 8. Resultado de la regresión binomial negativa para choques totales en segmentos en las Rutas Nacionales 34, 32 y 2.

	Variable	Estimación	Error Estándar	Valor de z	Pr ( $z >  z $ )	Significancia
Ruta Nacional 34	Intercepto	-4.663	1.316	-3.543	0.0004000	***
	TPDA	0.549	0.138	3.986	0.0000671	***
	Densidad de accesos	0.090	0.032	2.798	0.0050000	**
	3 carriles	0.494	0.202	2.441	0.0150000	*
	4 carriles	0.538	0.388	1.388	0.1650000	
	Tipo de zona urbana	0.681	0.155	4.381	0.0000118	***
Ruta Nacional 32	Intercepto	-10.415	1.579	-6.596	0.0000000	***
	TPDA	0.476	0.151	3.158	0.0015900	**
	Número de carriles	0.248	0.142	1.742	0.0814500	.
	Densidad de accesos	0.082	0.011	7.621	0.0000000	***
Ruta Nacional 2	Intercepto	-5.509	0.115	-48.086	0.0000000	***
	Accesos por km	0.108	0.032	3.428	0.0006080	***
	Número carriles (3; 1 carril ascenso)	2.709	0.919	2.947	0.0032120	**
	Número carriles (4 y 5 carriles)	1.736	0.431	4.030	0.0000557	***

Tabla 9. Resultado de la regresión binomial negativa para choques totales en intersecciones en las Rutas Nacionales 34 y 2.

	Variable	Estimación	Error Estándar	Valor de z	Pr ( $z >  z $ )	Significancia
Ruta Nacional 34	Intercepto	-4.564	2.600	-1.755	0.0790000	.
	TPDA vía primaria	0.700	0.266	2.631	0.0090000	**
	Vía secundaria cantonal	-0.801	0.489	-1.637	0.1020000	
	Intersección tipo otras	-0.152	0.714	-0.213	0.8310000	
	Intersección tipo T	-1.403	0.313	-4.485	0.0000073	°
Ruta Nacional 2	Intercepto	2.082	0.440	4.735	0.0000022	***
	Ruta terciaria	-0.701	0.570	-1.230	0.2188250	
	Ruta cantonal	-1.552	0.460	-3.374	0.0007410	***
	Más de 2 carriles en la vía principal	-1.508	0.238	6.333	0.0000000	***

Tabla 10. Resultado de la regresión binomial negativa para choques equivalentes a solo daños materiales en intersecciones en las Rutas Nacionales 34 y 2.

	Variable	Estimación	Error Estándar	Valor de z	Pr ( $z >  z $ )	Significancia
Ruta Nacional 34	Intercepto	-7.130	3.127	-2.280	0.0230000	*
	TPDA vía primaria	0.997	0.319	3.126	0.0020000	**
	Vía secundaria cantonal	-0.786	0.638	-1.232	0.2180000	
	Intersección tipo otras	-0.441	0.954	-0.462	0.6440000	
	Intersección tipo T	-1.255	0.403	-3.111	0.0020000	**
Ruta Nacional 2	Intercepto	2.624	0.631	4.207	0.0000258	***
	Ruta terciaria	0.073	0.800	0.092	0.9270200	
	Ruta cantonal	-0.790	0.652	-1.210	0.2261100	
	Más de 2 carriles en la vía principal	0.961	0.315	3.053	0.0022600	**

#### 4.4 Diagnóstico y soluciones propuestas

Una vez seleccionados los sitios de concentración de choques, se realizó un diagnóstico de cada uno por medio de un análisis detallado de los datos de choques y de los levantamientos realizados en las visitas de campo. Las medidas detalladas recomendadas para cada uno de los sitios críticos no se incluyen en este artículo, pero los lectores interesados pueden consultar el Trabajo Final de Graduación “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” (Varela, 2016).

De acuerdo con los resultados, se evidencia que existen problemas de seguridad vial en esta carretera. Una de las principales problemáticas encontradas es la falta de facilidades para peatones y ciclistas, así como problemas con la gestión de accesos, anchos de espaldón, velocidad y diseño de intersecciones. A continuación, se presentan, de manera general, las medidas de mitigación propuestas.

En muchos segmentos el ancho de espaldón es insuficiente o inexistente, por lo que se recomienda ampliarlo a por lo menos 2,0 m – 2,5 m.

Adicionalmente, entre las recomendaciones para mejorar las facilidades peatonales se encuentran: darle continuidad a algunas aceras, estudiar la posibilidad de colocar pasos peatonales cerca de algunas intersecciones y evaluar el desempeño de las medidas colocadas recientemente. Aunado a lo anterior, se recomienda aplicar medidas de tráfico calmado para reducir la velocidad de los vehículos motorizados en zonas de alto tránsito peatonal y de ciclistas, y donde estos usuarios deberían tener prioridad.

Se recomienda construir bahías para autobuses en los segmentos en donde no existen, así como restringir el adelantamiento en los todos tramos donde haya bahías a lo largo de la carretera para no aumentar el riesgo de choques y atropello.



Para el caso de los ciclistas en particular, se recomienda además evaluar la posibilidad de construir una cicloavía en algunos segmentos de la carretera, pues en estas zonas muchas personas se movilizan utilizando este medio de transporte sin contar con facilidades para hacerlo.

También se recomienda realizar un estudio de velocidades para reducir la velocidad límite establecida en algunas de las intersecciones y los segmentos más críticos.

Por otro lado, las carreteras principales y con velocidades altas de operación deberían tener la menor cantidad de accesos posibles, por lo que se recomienda aplicar técnicas para gestionar adecuadamente los accesos, y con esto reducir la cantidad de flujos que entran y salen de la carretera.

Asimismo, se recomienda utilizar carriles exclusivos de giro en las entradas a gasolineras, sitios importantes con altos flujos vehiculares, o en algunas intersecciones con maniobras complicadas en las que se requiera invadir un carril, con el fin de que se faciliten las maniobras y se disminuya la probabilidad de ocurrencia de choques.

Finalmente, se recomienda demarcar correctamente las líneas de borde, las líneas de centro y las líneas canalizadoras, con el fin de definir adecuadamente el área de operación de la carretera y de guiar a los conductores, así como instalar marcas resaltadas en el pavimento en algunos segmentos de la carretera.

## 5. CONCLUSIONES

Existe una gran variedad de métodos de medición de desempeño que pueden ser utilizados para evaluar el potencial de reducción de choques en un sitio. Las consideraciones clave en la selección del método de medición de desempeño son: la disponibilidad de datos, el sesgo de regresión a la media y cómo se establece el umbral de desempeño. El método de exceso de frecuencia de choques esperados con ajuste de Bayes empírico toma en cuenta estas consideraciones, y además es un método preciso y confiable.

Esta investigación constituye el primer estudio realizado de manera exclusiva y detallada de la Ruta Nacional 34 en términos de seguridad vial, por lo que los resultados obtenidos representan un insumo importante para futuras investigaciones.

En Costa Rica se cuenta con la información necesaria para realizar este tipo de estudios (al menos en las vías principales) y los resultados obtenidos lo comprueban, pues algunos de los sitios que resultaron críticos en el modelo ya han sido evaluados con otros métodos y en otros estudios (aunque no con el mismo detalle) alertando que presentan problemas de seguridad vial.

Para realizar este proyecto se utilizó el proceso de gestión de seguridad vial publicado en el Manual de Seguridad en Carreteras en 2010 por la AASHTO. Este es un método actualizado y que ha dado resultados confiables, además de que se adapta en buena medida a las carreteras costarricenses y a la información disponible. Entre las ventajas de utilizarlo está que es un proceso sistemático y repetible, tanto en esta como en otras carreteras del país.

Para el caso de choques totales en segmentos, las variables que resultaron significativas fueron el TPDA, la densidad de accesos, carreteras con tres y cuatro carriles, y el tipo

de zona urbana. Mientras que, tanto en el caso de choques totales como en el caso de choques equivalentes a solo daños materiales en intersecciones, las variables que resultaron significativas fueron el TPDA de la principal (Ruta Nacional 34), el tipo de carretera secundaria cantonal, el tipo de intersección “otras” y el tipo de intersección T.

Comparando los resultados obtenidos en esta investigación con los resultados obtenidos en otras carreteras del país, se pudo observar cómo, principalmente en el caso de segmentos, no solo las variables que resultaron significativas fueron las mismas en su mayoría (TPDA, densidad de accesos y número de carriles), sino que también los resultados fueron consistentes debido a la similitud de los coeficientes obtenidos. Por otra parte, si bien en los resultados de intersecciones, no se obtuvieron las mismas variables significativas, sí se encuentran coincidencias como que en los casos en que la intersección se da con una vía secundaria cantonal se disminuye la probabilidad de ocurrencia de choques, lo cual lleva a la conclusión de que las problemáticas encontradas en las tres carreteras son similares.

Entre los principales problemas encontrados se hallan la falta de facilidades para usuarios vulnerables y problemas con la gestión de accesos, anchos de espaldón, velocidad de operación y diseño de intersecciones.

## REFERENCIAS

- Agüero-Valverde, J. y Jovanis, P.P. (2006). *Identifying Road Segments with High Risk of Weather-Related Crashes Using Full Bayesian Hierarchical Models*. Washington, D.C: Transportation Research Board.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2010). *Highway Safety Manual*. Washington, DC.
- Castro, E. (2013). *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*. (Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil). Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Castro, E. y Agüero-Valverde, J. (2015). Aplicación del método Bayes empírico en análisis de seguridad vial: el caso de la ruta 32 en Costa Rica. *Revista Ingeniería*, 25(1), 13-33.
- Consejo de Seguridad Vial. (2017). *Plataforma de datos abiertos*. Consultado el 16 de noviembre de 2017 en: <http://datosabiertos.csv.go.cr>
- Hauer, E. (1996). Identification of Sites with Promise. *Transportation Research Board*, 1542, 54-60.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2013). *Panorama demográfico: Año 2013*. Consultado el 29 de diciembre de 2015 en: [http://www.inec.go.cr/wwwisis/documentos/INEC/Boletines/Panorama%20Demografico/Panorama\\_Demogr%C3%A1fico\\_2013.pdf](http://www.inec.go.cr/wwwisis/documentos/INEC/Boletines/Panorama%20Demografico/Panorama_Demogr%C3%A1fico_2013.pdf)
- Leiva, M. (2016). *Análisis de sitios de concentración de choques viales en la Ruta Nacional 2, utilizando el método de exceso de frecuencia de choques esperado*. (Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil). Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2011). *Inventario de la Red Vial Nacional*. San José: Dirección de Planificación Sectorial.

- Organización Mundial de la Salud. (2015). *Lesiones causadas por el tránsito*. Consultado el 29 de diciembre de 2015 en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs358/es/>
- Sánchez, L., Agüero-Valverde, J. y Pujol, R. (2015). *Costos de los choques viales en Costa Rica. Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS)*. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Unidad de Auditorías Técnicas LanammeUCR-PITRA. (2010). *Evaluación de Seguridad Vial Proyecto Costanera Sur, Ruta Nacional N° 34 Sección: Quepos-Barú*. (Informe de auditoría técnica externa). San José: Universidad de Costa Rica.
- Unidad de Evaluación de la Red Vial Nacional LanammeUCR-PITRA. (2011). *Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica: Identificación de zonas de riesgo de accidentes Rutas 1, 2, 32 y 34*. (Programa de Infraestructura del Transporte). San José: Universidad de Costa Rica.
- Varela, V. (2016). *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*. (Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil). Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.