

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

ANÁLISIS DE CHOQUES EN LA RUTA 27 USANDO MODELOS MULTIVARIADOS

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de
Posgrado en Ingeniería Civil para optar por el grado y título de Maestría
Académica en Ingeniería de Transporte y Vías

LIL MARÍA MOYA FERNÁNDEZ

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2019

Dedicatoria

A mi mamá, quien, a pesar de no estar ya en este mundo, sé que me cuida siempre.

Agradecimientos

A Dios, en quien encontré fortaleza en los momentos más difíciles.

A mi esposo Daniel, que me ha apoyado todo este tiempo.


A mi papá y hermano menor, que sé están orgullosos de mí.

A mi tribunal evaluador por su guía desde el inicio de este trabajo.

Esta Tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios en Posgrado en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Ingeniería de Transporte y Vías.



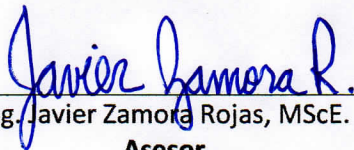
Ing. Rosendo Pujol Mesalles, Ph.D.
**Representante del Decano
Sistema de estudios de Posgrado**



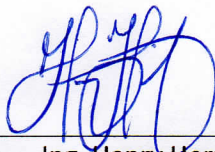
Ing. Jonathan Agüero Valverde, PhD.
Director de Tesis



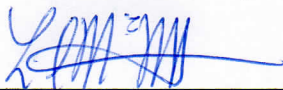
Ing. Diana Jiménez Romero, M.Sc., MBA.
Asesora



Ing. Javier Zamora Rojas, MScE.
Asesor



Ing. Henry Hernández Vega, M.Sc.
**Representante Director Programa de Posgrado en
Ingeniería Civil**



Ing. Lil María Moya Fernández
Candidata

Contenido

Lista de cuadros	vii
Lista de ilustraciones y figuras	viii
Lista de abreviaturas	x
1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Formulación del problema	4
1.3. Propósito de la investigación	4
1.4. Objetivo general y objetivos específicos.....	5
1.5. Alcances y limitaciones	6
1.6. Importancia del estudio	6
1.7. Antecedentes	7
2. Marco teórico.....	9
2.1. Modelos multivariados	9
2.2. Regresión Binomial Negativa	10
2.3. Modelo de regresión de Poisson.....	11
2.4. Bayes Completo	11
2.5. Método de exceso de frecuencia de choques esperados.....	13
2.6. Variables normalmente utilizadas en modelación de choques	14
3. Metodología.....	17
4. Resultados y análisis.....	20
4.1. Procesamiento de datos	20
4.1.1. Planos as built del proyecto.	20
4.1.2. Datos de accidentes facilitados por la concesionaria.	20
4.1.3. Volumen de tránsito.....	23
4.2. Definición de tramos homogéneos.....	24
4.3. Distribución espacial de los accidentes.....	25
4.4. Generación de la base de datos para análisis	25

4.5.	Descripción de los datos procesados	27
4.6.	Estadística descriptiva de las variables	31
5.	Modelación	51
5.1.	Funciones de desempeño	51
5.2.	Modelos Multivariados	59
6.	Tramos con exceso de choques	64
6.1.	Identificación de tramos con exceso de choques	64
6.2.	Caracterización de los tramos y propuesta de soluciones.....	64
7.	Conclusiones	76
8.	Recomendaciones	79
9.	Referencias.....	81

RESUMEN

Durante el proceso de diseño de una carretera se debe incluir el tema de seguridad vial, considerando aquellos aspectos del diseño que puedan afectar a los usuarios, provocando confusión o comportamientos peligrosos. De esta forma, se puede prevenir las posibles deficiencias de la infraestructura, incluyendo en el diseño características que permitan disminuir la probabilidad de ocurrencia de choques y en caso de que ocurran, disminuyendo las severidades.

El objetivo principal de este estudio es realizar un diagnóstico de la problemática de seguridad vial en la Ruta 27 por medio de la aplicación de modelos multivariados, a partir de la ocurrencia de choques viales, para identificar tramos de mayor concentración de choques y las variables que están asociadas a su ocurrencia.

Se requirió procesar los datos de choques ocurridos entre los años 2009 y 2015, haciendo una revisión exhaustiva de la base de datos y clasificando los choques por tipo y severidad. Posteriormente se determinó los tramos homogéneos de la carretera, de acuerdo con las características geométricas obtenidas a partir de los planos *as built*. Se determinó además que dicha carretera posee dos grandes tramos con características muy marcadas, uno de tipo autopista y el otro, de carretera de dos carriles.

Utilizando estos tramos como unidad estadística de análisis, se procedió a hacer una caracterización con estadística descriptiva. Luego, se hizo la modelación aplicando funciones de probabilidad de Poisson y Binomial Negativa, para obtener las funciones de desempeño de los tramos analizados.

Utilizando Bayes Completo, se procedió a realizar los modelos multivariados de los tramos de autopista y carretera de dos carriles.

Se pudo observar que el uso de Modelos Multivariados, permite obtener un mejor ajuste, disminuyendo los errores y presentando mejores indicadores que aplicando Modelos Univariados.

Se identificaron los tramos de concentración de choques, y una vez hecho esto, se propusieron medidas de mitigación para disminuir la frecuencia y severidad de choques en cada uno.

Se observó que los tramos identificados contienen características en común, al mismo tiempo que las medidas por aplicar se enfocarían en gran parte en problemas similares en varios de los tramos analizados.

Finalmente se hacen recomendaciones puntuales a tomar en cuenta en una posible ampliación de la carretera, pues al hacer un diseño, se puede tener la ventaja de no repetir los errores cometidos inicialmente, en el diseño de la carretera tal y como se encuentra actualmente.

Palabras clave: Ruta Nacional 27, choques viales, exceso de frecuencia de choques, seguridad vial, tramos homogéneos, severidad, Bayes Completo.

Director: Ing. Jonathan Agüero Valverde Ph.D

Sistema de Estudios de Posgrado

Lista de cuadros

Cuadro 1.	Datos de estaciones permanentes de la Ruta 27.....	23
Cuadro 2.	Datos de TPDA calculados.....	24
Cuadro 3.	Cantidad de choques por tipo y por año.....	30
Cuadro 4.	Variables dependientes.....	32
Cuadro 5.	Variables independientes.....	38
Cuadro 6.	Tipo de tramo según alineamiento vertical.....	39
Cuadro 7.	Resultado de modelo Poisson, total de choques.....	52
Cuadro 8.	Resultado de modelo Poisson, daños materiales.....	53
Cuadro 9.	Resultado de modelo Poisson, heridos leves.....	54
Cuadro 10.	Resultado de modelo Poisson, heridos graves.....	55
Cuadro 11.	Resultado de modelo Poisson, víctimas mortales.....	55
Cuadro 12.	Resultado de modelo Binomial Negativo, total de choques.....	56
Cuadro 13.	Resultado de modelo Binomial Negativo, daños materiales.....	57
Cuadro 14.	Resultado de modelo Binomial Negativo, heridos leves.....	57
Cuadro 15.	Resultado de modelo Poisson, heridos graves.....	58
Cuadro 16.	Resultado de modelo Poisson, víctimas mortales.....	58
Cuadro 17.	Resultados de modelo multivariado y univariado para el tramo de autopista.....	60
Cuadro 18.	Resultados de modelo multivariado y univariado para el tramo de carretera de 2 carriles.....	61
Cuadro 19.	Resultados de modelo de total de choques para el tramo de autopista.....	62
Cuadro 20.	Resultados de modelo de total de choques para el tramo de 2 carriles.....	62
Cuadro 21.	Choques equivalentes.....	64
Cuadro 22.	Tramos con exceso de choques.....	64

Lista de ilustraciones y figuras

Figura 1. Metodología aplicada.....	19
Figura 2. Cantidad de choques por año	28
Figura 3. Cantidad de choques por gravedad y por año	29
Figura 4. Porcentaje de choques por tipo y por año.....	30
Figura 5. Porcentaje de choques por gravedad y por tipo.....	31
Figura 6. Cantidad de choques por gravedad y por periodo del día.....	32

Lista de mapas

Mapa 1. Total de choques.....	33
Mapa 2. Choques con víctimas mortales.....	34
Mapa 3. Choques con heridos graves.....	35
Mapa 4. Choques con heridos leves.....	36
Mapa 5. Choques con daños materiales.....	37
Mapa 6. TPDA 2014.....	41
Mapa 7. Tipo de sección.....	42
Mapa 8. Número de carriles.....	43
Mapa 9. Ancho de espaldón.....	44
Mapa 10. Ancho de mediana o división física.....	45
Mapa 11. Peralte de curvas horizontales.....	46
Mapa 12. Radio de curvas horizontales.....	47
Mapa 13. Pendientes de tangentes verticales.....	48
Mapa 14. K de curvas verticales.....	49
Mapa 15. Velocidad límite.....	50
Mapa 16. Tramos con exceso de choques	65

Lista de abreviaturas

AIC: Akaike's An Information Criterion (Criterio de Información de Akaike)

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes)

COSEVI: Consejo de Seguridad Vial

CMF: Crash Modification Factors (Factores de Modificación de Choques)

DIC: Deviance Information Criterion (Criterio de Información de Desviación)

HSM: Highway Safety Manual (Manual de Seguridad de Carreteras)

INLA: Integrated Nested Laplace Approximations (Aproximaciones Integadas Anidadas de Laplace)

MOPT: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

OMS: Organización Mundial de la Salud

OPS: Organización Panamericana de la Salud

SIG: Sistemas de Información Geográfica

SPF: Safety Performance Function (Funciones de Desempeño de Seguridad)

TPDA: Tránsito Promedio Diario Anual



Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Lil María Moya Fernández, con cédula de identidad 1-1087-0540, en mi condición de autor del TFG titulado Análisis de choques en la Ruta 27 usando modelos multivariados

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Lil María Moya Fernández

Número de Carné: 992778 Número de cédula: 1-1087-0540

Correo Electrónico: lil.moya@gmail.com

Fecha: 22/10/2019 Número de teléfono: 8910-7598

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): Jonathan Agüero Valverde

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

1. Introducción

1.1. Introducción

Los choques viales son una de las principales causas de muerte en el mundo, como lo indica el Plan Mundial para el Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020:

“Cada año, cerca de 1,3 millones de personas fallecen a raíz de un accidente de tránsito – más de 3000 defunciones diarias – y más de la mitad de ellas no viajaban en automóvil. Entre 20 millones y 50 millones de personas más sufren traumatismos no mortales provocados por accidentes de tránsito, y tales traumatismos constituyen una causa importante de discapacidad en todo el mundo. El 90% de las defunciones por accidentes de tránsito tienen lugar en los países de ingresos bajos y medianos, donde se halla menos de la mitad de los vehículos matriculados en todo el mundo. Entre las tres causas principales de defunciones de personas de 5 a 44 años figuran los traumatismos causados por el tránsito.”

De acuerdo con la OMS, en su informe mundial de 2018, hay 1,35 millones de muertes por choques viales cada año a nivel mundial, siendo esta la octava causa de muerte en personas de todas las edades y la primera causa de muerte en personas de 5 a 29 años de edad; siendo además que la proporción de muertes en países de bajos ingresos es tres veces mayor que en países de altos ingresos.

También se indica en dicho informe que cuando la seguridad es tomada en cuenta durante la planificación, diseño y operación de las carreteras, se pueden hacer contribuciones substanciales para reducir las muertes y lesiones por accidentes de tránsito. Las inspecciones y calificación de las carreteras pueden proveer mecanismos para identificar deficiencias en la infraestructura, que puedan afectar la ocurrencia y severidad de choques. Mejorando las carreteras de alto riesgo y proveyendo un transporte público accesible, reduciría las muertes y lesiones en carretera. La infraestructura vial está altamente ligada a las severidades graves o fatales en choques viales, así como la mejora en la misma es crítica para mejorar la seguridad de las carreteras.

De acuerdo con la OPS en su informe de 2019, para la Región de las Américas en el año 2016, 154.997 personas perdieron la vida por causa de choques viales, manteniéndose estable el dato de la tasa de mortalidad en comparación con el año 2013. A nivel regional, las muertes causadas por el tránsito son la segunda causa principal de mortalidad en adultos jóvenes de 15 a 29 años. Durante el periodo de 2013-2016, el número general de muertes causadas por el tránsito aumentó en 13 países de ingresos medianos (entre los que se incluye a Costa Rica). De acuerdo con este informe, en la región, se produjeron 154.997 muertes por choques viales en el 2016, representando 11% de las muertes mundiales por esta causa. La OPS no registra que en ese periodo se hayan realizado evaluaciones o calificación de estrellas (método del Programa Internacional de Evaluación de Carreteras) a las carreteras o nuevas vías para garantizar que las normas de diseño satisfagan las necesidades de los usuarios vulnerables. Estas evaluaciones son esenciales para garantizar el desplazamiento seguro de los usuarios.

En Costa Rica se tiene también que los accidentes de tránsito son una de las principales causas de muerte y discapacidad. Para el año 2012 hubo un total de 63129 accidentes, de los cuales un 15,7% tuvo víctimas y se tuvo un total de 675 personas fallecidas. También para ese año, un 68% de los accidentes ocurrió en vías nacionales, y un 56% del total de accidentes se ubicó en el Valle Central. Finalmente, se identificó seis cantones con mayor riesgo por tener un 27% de muertos y heridos graves por accidentes de tránsito: Puntarenas, Pérez Zeledón, San José, San Carlos, Alajuela y Pococí (COSEVI, 2014). Entre los años 2012 a 2017 (COSEVI, 2019), ha habido un incremento en la cantidad de muertes in situ por accidentes de tránsito, pasando de 298 fallecidos en 2013 a 488 en 2017; por otra parte, la cantidad de heridos graves en el mismo periodo oscila cerca de los 2500 heridos.

De acuerdo con un análisis realizado a nivel de las rutas nacionales, en 2016 por Agüero-Valverde, generó como resultado la identificación de las rutas más peligrosas, con mayor exceso de frecuencia de muertes, donde la ruta nacional 27 se encuentra como la novena más peligrosa.

Debido a lo anterior, esta investigación pretende hacer un análisis de los choques ocurridos en la ruta nacional 27 desde su apertura, poniendo énfasis en las causas que provocaron dichos accidentes, lo cual incluye variables que relacionan las características propias de la carretera con la ocurrencia de choques. Una ventaja para esta investigación, es que se puede tener acceso a datos

bastante completos de volúmenes de tránsito, choques y geometría, lo cual permitirá hacer un mejor análisis.

Se utilizarán datos de los choques viales ocurridos en la ruta, ubicados espacialmente, para poder definir tramos de concentración de choques que serán utilizados en el análisis estadístico. Para lograr esto se encontraron relaciones entre aspectos como, el ancho de carriles y espaldones, obstáculos en el borde de la vía, pendientes de taludes, entre otros, con la incidencia de choques viales, utilizando modelos multivariados para análisis estadístico.

Finalmente, se generaron las Funciones de Desempeño de Seguridad (SPFs, por sus siglas en inglés), las cuales son ecuaciones que se utilizaron para estimar o predecir la frecuencia promedio de accidentes por año en un punto, como función del volumen del tránsito y de las características de la vía (AASHTO, 2010), para el caso específico de la ruta nacional 27, según lo que se aplica por medio de la metodología de análisis de choques del Manual de Seguridad de Carreteras (HSM, por sus siglas en inglés) de AASHTO 2010.

Para el análisis se utilizó Modelos Multivariados, cuya predicción toma en cuenta la ocurrencia de todas las severidades de choques y todas las variables asociadas a la probabilidad de que se den.

De acuerdo con Agüero-Valverde & Jovanis (2009), los análisis de seguridad vial han utilizado tradicionalmente distribuciones de Poisson o Binomial Negativas univariadas, para estimar los choques de diferente nivel de severidad. Se indica en dicho artículo, que existen variables no observadas u omitidas que son compartidas por todos los tipos de severidad, sin embargo, la ocurrencia de choques es multivariada por naturaleza. Un modelo multivariado se ajusta mejor que un modelo univariado y optimiza la precisión de la estimación de la frecuencia de choques. Las covarianzas y correlaciones entre las severidades de choques son altas. Los modelos multivariados utilizan costos para identificar los tramos con exceso de choques. Este análisis genera resultados de costos y exceso de costos más altos que con la estimación con modelos univariados, debido a la estimación más alta de los choques fatales y con heridos graves, debido al parámetro de efectos aleatorios. También existe una correlación entre niveles de severidad contiguos, además, se menciona que en las investigaciones de choques viales normalmente se encuentra que la simple diferencia de unos microsegundos puede diferenciar la ocurrencia de choques con heridos graves,

de choques con solo daños materiales. Se concluye que puede haber fuertes correlaciones entre niveles, que no se reconocen al hacerse conteos agregados o modelos separados para cada nivel.

1.2. Formulación del problema

La seguridad vial es actualmente el factor que está tomando más importancia en el campo de la ingeniería de transportes y el diseño de carreteras, pues las muertes causadas por choques viales son cada vez mayores, en países de ingresos medios y bajos.

En nuestro país, no se le ha dado la importancia necesaria al tema de seguridad vial, en relación con el diseño y construcción de nuevas carreteras o mejoras en vías existentes. El diseño de la señalización vial y de los dispositivos de seguridad en la carretera ha sido siempre dejado en un último lugar y es común observar serios problemas en la infraestructura vial por esta causa, los cuales no solo pueden provocar accidentes, sino también que estos sean más graves. Igualmente, se ha dejado de lado el tema de seguridad vial en el diseño geométrico, de forma que las vías existentes poseen características que inducen a error a los usuarios o que los expone a mayores riesgos, siendo poco amigables para estos, de forma que muchas de sus características de diseño provocan un incremento en la incidencia de choques viales.

No existe una metodología específica que se aplique a las condiciones del país, para medir la frecuencia de choques para tipos específicos de sitios y que facilite la predicción de la ocurrencia de choques, así como de la disminución de la cantidad y severidad de estos al aplicar algún tipo de mejora en la infraestructura. Por esto, es importante contar con la calibración de modelos en las rutas nacionales y así empezar a generar funciones de desempeño aplicables a nivel nacional.

1.3. Propósito de la investigación

El Manual de Seguridad de Carreteras (HSM, por sus siglas en inglés) de AASHTO 2010, aplica la metodología llamada "Método Predictivo" que consiste en un procedimiento de varios pasos para estimar la ocurrencia de choques en una red o una facilidad, seleccionando tramos de concentración de choques a partir de los datos de choques, TPDA y características geométricas. A partir de estos datos, se determina la frecuencia de choques viales en un sitio en particular en un periodo dado, por medio de modelos de regresión.

Los modelos de regresión generados para un tipo particular de sitio para condiciones base, se conocen como Funciones de Desempeño de Seguridad (SPFs, por sus siglas en inglés). Cuando en este tipo de sitio se aplica alguna mejora que aumenta su seguridad, disminuyendo la cantidad o severidad de choques que se dan, se pueden obtener los Factores de Modificación de Choques (CMFs, por sus siglas en inglés).

Para poder aplicar este método en Costa Rica de una manera efectiva, es necesario calibrar las SPFs para las condiciones base de las carreteras de nuestro país. En esta investigación, se generaron las SPFs para la ruta nacional 27, pues al haber datos más completos de esta ruta desde su apertura, fue posible hacer un mejor análisis y generar modelos de mejor calidad.

Se hizo una evaluación de tramos de concentración de choques en la ruta por estudiar, aplicando métodos de análisis estadístico multivariado con modelos de Bayes Completo y análisis de exceso de frecuencia de choques. Más adelante, se explican con más detalle los modelos multivariados y el análisis de exceso de choques.

1.4. Objetivo general y objetivos específicos

Objetivo general

Realizar un diagnóstico de la problemática de seguridad vial en la ruta 27 por medio de la aplicación de modelos multivariados, a partir de la ocurrencia de choques viales, para identificar tramos de mayor concentración de choques y las variables que están asociadas a su ocurrencia.

Objetivos específicos

- Caracterizar la ruta por analizar, en términos de su geometría, TPDA, frecuencia y gravedad de choques.
- Generar las funciones de desempeño para cada gravedad de choque, para la ruta en estudio.
- Identificar los tramos de concentración de choques en la ruta analizada.

- Proponer soluciones generales para los problemas de infraestructura identificados en los tramos de concentración de choques.

1.5. Alcances y limitaciones

En esta investigación se hizo el análisis de los choques ocurridos en la ruta nacional 27 desde su apertura en el año 2010 hasta el año 2014. Para esto se utilizaron datos de la ruta nacional 27, facilitados por el Consejo Nacional de Concesiones y la empresa concesionaria Global Vía, respecto a choques, volúmenes de tránsito, señalización y geometría, así como datos del volumen de tránsito.

La principal limitación estuvo en los datos de choques, debido a la cantidad y calidad de la información disponible, así como su localización geográfica. Para mejorar la precisión de la modelación, lo recomendable es contar con suficientes datos de los choques ocurridos y con buena información. Otra limitación presentada, consiste en que el análisis se hizo con un periodo de datos de cinco años posteriores a la apertura de la carretera, por lo que se tiene una curva de aprendizaje en la toma de datos de choques y también un periodo de usuarios novatos en la carretera.

1.6. Importancia del estudio

El análisis estadístico de los choques viales es un tema que se ha estudiado desde hace pocos años en nuestro país, lo cual hace necesaria la investigación en esta área. Por otra parte, a nivel mundial, se ha incrementado la preocupación por mejorar la seguridad vial y orientar el diseño de carreteras a garantizar infraestructura más segura, en busca de la disminución de la cantidad y severidad de los accidentes, lo cual implica una mayor protección de la vida humana. Es importante también señalar que los problemas de seguridad vial evidentes en la ruta 27, hacen que un análisis en esta vía cobre una gran relevancia, especialmente en el contexto de una futura ampliación de esta vía a 4 carriles, donde será crucial tomar en cuenta los aspectos que actualmente implican mayor incidencia y severidad de choques.

Esta investigación toma como enfoque una metodología estadística que genera información importante para la realización de un trabajo científico en el enfoque de las causas de los accidentes asociadas a los defectos en el diseño de la infraestructura específico para nuestro país y, por lo tanto, en la medición del impacto de las mejoras que pueden ser aplicadas.

Se identificaron los tramos de concentración de choques, y una vez hecho esto, se propusieron medidas de mitigación para disminuir la frecuencia y severidad de choques en cada uno, y de esta forma mejorar la seguridad vial en una de las rutas más importantes del país.

1.7. Antecedentes

Hay varios estudios que se han hecho en los últimos años en relación con este tema a continuación, se presentan los que se consideraron más relevantes para esta investigación:

- Castro, E. (2013), hace un análisis de la frecuencia de choques viales en la Ruta 32, aplicando el método de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes empírico. Se ubicaron los choques viales en la carretera, la cual se dividió en segmentos que fueron clasificados según la frecuencia de choques y su respuesta positiva a las mejoras. Hace un análisis estadístico de los choques según su severidad y con el método estadístico se obtuvo el exceso de frecuencia de choques, seleccionando los primeros 15 segmentos para analizarlos más detalladamente y proponer medidas de mitigación.
- Madriz, B. (2013), hace un análisis de la base de datos de choques del COSEVI específicamente en las rutas nacionales y utiliza modelos Logit ordenados para analizar las variables que intervienen en la gravedad de los choques, como las características de la vía y de las personas involucradas.
- Agüero, J. (2013), aplica modelos multivariados integrando la variable especial, para poder calcular el exceso de frecuencia de accidentes a nivel de cantón en Costa Rica. Los resultados se comparan con un modelo univariado.
- Agüero, J. y Jovanis, P. (2009), aplican modelos de Bayes multivariado con Poisson Lognormal para estimar la frecuencia de choques para distintas severidades y lo compara con otros modelos Poisson Lognormal de una variable. El análisis se hace con datos del departamento de transportes de Pensilvania.
- Chen, Y. y Persaud, B. (2014), en su artículo hacen referencia a las limitaciones metodológicas de los Factores de Modificación de Choques (CMF), especialmente cuando se aplican varias mejoras, por lo que desarrollan una metodología en la cual primero calculan las Funciones de Desempeño de Seguridad (SPFs) con componentes de Funciones

de Modificación de Choques para aproximar los CMF. Utilizan modelos altamente especificados y modelos jerárquicos.

2. Marco teórico

Para la identificación de los tramos más peligrosos, es decir, los que poseen mayor exceso de choques sobre tramos similares, se aplicó la metodología de análisis mediante modelos multivariados, específicamente el método de Bayes Completo. Se parte de la generación de las funciones de desempeño que parten de las funciones de probabilidad aplicando las regresiones de Poisson y Binomial Negativa.

2.1. Modelos multivariados

Para predicción de accidentes se han aplicado diversas metodologías para modelación, algunas de las cuales presentan importantes errores a la hora de hacer las estimaciones. Para evitar este tipo de errores es importante conocer los datos que se van a analizar y lo que se desea predecir, y a partir de esto, seleccionar el modelo a utilizar.

Existen varios problemas que se dan normalmente en los datos y metodologías de análisis de accidentes, entre los que se encuentran los siguientes (Lord y Mannering, 2010):

- Dispersión alta o baja.
- Variables que se explican con base en variaciones en el tiempo.
- Variables correlacionadas temporal y espacialmente.
- Media baja y tamaño de muestra pequeño.
- Correlación entre daños o severidad y tipo de choque.
- Menos accidentes reportados de los que ocurren en realidad.
- Variables endógenas (alta relación entre la variable dependiente y la independiente).

Lord y Mannering hicieron un análisis de varias metodologías utilizadas para la predicción de accidentes, entre las cuales se incluyen los métodos bivariados o multivariados, los cuales pueden modelar distintos tipos de accidentes de manera simultánea (dos o más tipos). Una gran ventaja que tienen estos modelos, además de permitir la modelación de varios tipos de accidentes, es que son más flexibles y se pueden utilizar distintos tipos de ecuaciones, desde las lineales hasta otras más complejas.

Lo anterior implica que se pueden hacer modelos que permitan predecir distintos tipos de accidentes como los fatales o con heridos graves, en vez de solamente estimar un número total de accidentes. Por otra parte, se tiene varios modelos multivariados como, por ejemplo, el Modelo Poisson Multivariado y el Modelo Poisson-Lognormal Multivariado.

2.2. Regresión Binomial Negativa

De acuerdo con Castro (2013) una distribución binomial negativa se puede considerar como una distribución de Poisson con media λ . Este modelo se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$\ln \lambda_i = x_i \beta + \varepsilon_i$$

Donde:

λ = Variable aleatoria gamma

X = vector de covariables

β = vector de coeficientes

ε = error

Entonces se tiene que la distribución probabilística marginal es:

$$\Pr(z) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-\lambda} \lambda^z}{z!} \frac{\beta^\mu \lambda^{\mu-1} e^{-\beta \lambda}}{\Gamma(\mu)} d\lambda = \frac{\Gamma(z+\mu)}{z! \Gamma(\mu)} \left(\frac{\beta}{\beta+1} \right)^\mu \left(1 - \frac{\beta}{\beta+1} \right)^z \quad (1)$$

Donde:

Γ = función Gamma

β , μ = parámetros de la variable gamma aleatoria λ (en este caso β es diferente al vector de coeficientes)

2.3. Modelo de regresión de Poisson

Tomando como ejemplo (Washington, Karlaftis, & Mannering, 2011) la probabilidad de que una intersección i que tenga y_i accidentes por año está dada por:

$$P(y_i) = \frac{EXP(-\lambda_i)\lambda_i^{y_i}}{y_i!} \quad (2)$$

Donde $P(y_i)$ es la probabilidad de que la intersección i tenga y_i accidentes por año y λ_i es el parámetro de Poisson por intersección i o el número de eventos esperados por periodo. La relación más común entre las variables explicativas y el parámetro de Poisson en el modelo log-lineal:

$$\lambda_i = EXP(\beta X_i) \text{ o } LN(\lambda_i) = \beta X_i$$

Donde X_i es el vector de variables explicativas y β es el vector de parámetros estimables. El número de eventos esperados por periodo está dado por $E[y_i] = \lambda_i = EXP(\beta X_i)$. Este modelo se puede estimar por métodos estándar de máxima verosimilitud con la siguiente función:

$$L(\beta) = \prod_i \frac{EXP[-EXP(\beta X_i)][EXP(\beta X_i)]^{y_i}}{y_i!} \quad (3)$$

2.4. Bayes Completo

Para este proyecto, se propone utilizar específicamente el modelo de *Full Bayes* o Bayes Completo, el cual se aplica actualmente en investigaciones, debido a la forma en que permite modelar múltiples variables e incorpora, además, efectos aleatorios (Agüero-Valverde y Jovanis, 2009).

La cantidad de choques puede ser considerada como una distribución Poisson:

$$y_{ijt} \sim \text{Poisson}(\theta_{ijt}) \quad (4)$$

Donde:

y_{ijt} = cantidad observada de choques en un segmento i , con severidad j , en un tiempo t , en años.

θ_{ijt} = la razón esperada de Poisson para un segmento i , con severidad j , en un tiempo t .

La razón de Poisson se puede modelar mediante una distribución lognormal:

$$\log(\theta_{ijt}) = \beta_{0j} + \sum_{k=1}^k \beta_{jk} X_{ijtk} + v_{ij} \quad (5)$$

Donde:

β_{0j} = intercepto para la severidad j.

β_{jk} = coeficiente para la covariable k y severidad j.

X_{ijtk} = valor de la covariable k, para el segmento i de la severidad tipo j en un tiempo t.

v_{ij} = efectos aleatorios de cada tipo de severidad, que se puede suponer que tienen la siguiente distribución:

$$v_{ij} \sim N(0, \tau_j^{-1}) \quad j = 1, \dots, 5 \quad (6)$$

Donde τ_j es el inverso de la varianza o precisión, la cual posee una distribución gamma con una media de 10 y una varianza de 10000.

$$\tau_j \sim \text{gamma}(0.01, 0.001) \quad j = 1, \dots, 5 \quad (7)$$

Esto es equivalente a una aproximación univariada Poisson Lognormal, para cada severidad, pero se puede comparar con una multivariada. Para el modelo multivariado, el vector de la distribución de los efectos aleatorios se estima usando la distribución normal multivariada:

$$v_i \sim MN(m_i, \Sigma) \quad (8)$$

Donde, m_i es un vector de ceros y Σ es la matriz de varianza-covarianza con una distribución:

$$\Sigma^{-1} \sim \text{Wishart}(R, n) \quad (9)$$

Donde:

Σ^{-1} = matriz positiva simétrica (matriz de precisión).

R = matriz de escala

n = grados de libertad, los cuales se recomienda que sean 5.

De acuerdo con Carriquiry, et al (2004), la aproximación de Bayes Completo, aplicado en modelos jerárquicos multivariados, es más ventajoso que el Bayes Empírico, debido a que en un análisis de este tipo se posee información previa de las aproximaciones de cada variable, de manera que se pueden aplicar investigaciones previas para analizar todas las variables, por lo que todas las incertidumbres son tomadas en cuenta y no es necesario desarrollar un pre proceso de los datos para obtener las Funciones de Desempeño.

2.5. Método de exceso de frecuencia de choques esperados

Lo que se busca es obtener las funciones de desempeño de seguridad (SPFs) para lo cual, en primer lugar, se procede a dividir la ruta en tramos homogéneos, y se toman sus características tales como el ancho de carril, ancho de espaldón, señalización vertical y horizontal, geometría, cantidad de accesos, entre otras.

Una vez definidas estas características se aplica el método Multivariado para definir las variables que entran en juego en el análisis y a partir de este se estima la cantidad de choques promedio prevista (N_{pred}) (HSM, 2010).

Seguidamente, se obtiene el ajuste por peso, el cual es la confiabilidad de la función de desempeño por utilizar:

$$w = \frac{1}{1 + k(N_{pred})} \quad (10)$$

Donde:

k = Parámetro de sobredispersión = $1/\theta$, donde θ es el valor obtenido por la función de distribución.

w = peso de Bayes empírico.

Se calcula la cantidad de choques esperada (N_{exp}) utilizando el ajuste de Bayes empírico:

$$N_{exp} = wN_{pred} + (1-w)N_{obs} \quad (11)$$

Donde:

N_{obs} = número de choques observado

Luego se calcula el exceso de frecuencia de choques esperado:

$$\Delta = N_{exp} - N_{pred} \quad (12)$$

Con esto se identificarán los tramos que presentan mayor cantidad de choques en comparación con la cantidad esperada. Al presentar estos tramos un exceso de frecuencia de choques, es necesario identificar las causas de esto y proponer las contramedidas para mejorar la seguridad en estos.

2.6. Variables normalmente utilizadas en modelación de choques

Se hizo una revisión bibliográfica para determinar las variables que normalmente son utilizadas en modelación de choques para casos similares al presente proyecto:

- Serhiyenko, V., Ivan, J. N., Ravishanker, N., e Islam, M. S. (2014) realizan una investigación en segmentos de carretera de acceso limitado de 4 o más carriles, generando un modelo por tipo de accidente (choque en direcciones opuestas, en la misma dirección, de un solo vehículo). Para choques en direcciones opuestas, las variables significativas fueron: logaritmo de longitud, logaritmo de TPDA, ancho de espaldón menor o mayor a 10 pies (3,048 metros), zona rural, ingreso de rampa presente; para choques de la misma dirección o de un solo vehículo: Logaritmo de longitud y TPDA, tipo de mediana, espaldón, zona rural, ingreso de rampa. Para el caso de los choques en dirección opuesta, la variable más significativa para 4 carriles, era el tipo de zona rural, siendo además negativa, por lo tanto, al estar la carretera en zona rural, es muy poco probable que se den este tipo de choques. En el caso de 6 y 8 carriles, las más importantes fueron el ancho de espaldón menor a 10 pies y la presencia de ingresos de rampa, ambas positivas, es decir que en estos casos la probabilidad de ocurrencia de choques es mayor.
- Wang, K., Ivan, J. N., Ravishanker, N., y Jackson, E. (2017), aplican la aproximación INLA y el modelo Multivariado Poisson Lognormal, para compararlo con el modelo Bayes Completo ajustado con el método de Cadenas de Markov Monte Carlo. Se estudiaron carreteras rurales de dos carriles, específicamente intersecciones con distintos tipos de control. Las variables utilizadas para el modelo fueron los distintos tipos de choques y severidades, TPDA, presencia de iluminación, de carriles de giros izquierdos y derechos. En el caso de los

modelos de severidad de choques, las variables más significativas para intersecciones de 3 vías, fueron el logaritmo del TPDA en la vía principal y la presencia de semáforo (relación negativa), mientras que, para intersecciones de 4 vías, fueron los logaritmos de TPDA de la vía principal y secundaria.

- Ma, J., Kockelman, K. M., y Damien, P. (2008) analizan por medio de modelos multivariados Poisson-Lognormal para distintas severidades modeladas de forma simultánea, aplicando además análisis Bayesiano, en carreteras rurales de dos carriles ubicadas en Washington. Las variables utilizadas en el modelo fueron: longitud de curva horizontal, grado de curvatura, longitud de curva vertical, pendiente vertical, ancho promedio de espaldón, ancho de superficie, límite de velocidad, límite de velocidad al cuadrado, TPDA, indicador de vía arterial menor, terreno ondulado, terreno montañoso. En el modelo de frecuencia de choques con solo daños materiales, las variables más significativas fueron el terreno montañoso, la pendiente vertical y el grado de curvatura. Para choques severos y fatales, la más representativa fue el terreno montañoso, mientras que para choques con heridos leves la más significativa fue si se trataba de un colector.
- Leiva (2016) analiza de 138 tramos y 90 intersecciones en la ruta nacional 2, para determinar el exceso de frecuencia de choques, tomando en cuenta las características de los choques y del entorno. Las variables de los modelos para los tramos fueron: accesos por km, número de carriles en dos categorías: 3 con carril de ascenso y 4 – 5 carriles.
- Varela (2016), analizó 16 segmentos y 11 intersecciones en la Ruta Nacional 34, utilizando el método de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes Empírico. Las variables significativas en su modelo fueron: TPDA, Densidad de accesos, número de carriles (2 clasificaciones: 3 y 4 carriles) y tipo de zona.
- Chiou, Y. C., Fu, C., y Chih-Wei, H. (2014) hacen estimaciones mediante modelo generalizado multinomial Poisson en una carretera en Taiwan. Utilizan como variables: curvatura, pendiente descendente máxima, cuadrado de pendiente descendente máxima, porcentaje de vehículos pequeños, adyacente a zona metropolitana, adyacente a aeropuerto, puerto o zona industrial, presencia de estación de peaje. La variable más significativa fue el porcentaje de vehículos pesados.
- Ahmed, M., Huang, H., Abdel-Aty, M., y Guevara, B. (2011) examina los efectos de seguridad de la geometría de los caminos en ocurrencia de choques a lo largo de secciones de

autopistas en terreno montañoso y clima adverso. Utiliza modelos de Poisson y modelos jerárquicos Bayesianos con efectos aleatorios y espaciales, para desarrollar los modelos de frecuencia de choques en segmentos de 20 millas con 6 años de datos de choques. Las variables de la carretera utilizadas en el modelo generado son: TPDA, millas vehículo viajadas por día, estación del año (seca, nevada) pendiente longitudinal en 8 categorías (la categoría 8 es usada como referencia), radio de curvatura, ángulo de deflexión de la curva, grado de curvatura, longitud de curvatura, porcentaje de curva por segmento (por longitud), número de carriles, ancho de mediana, ancho de espaldón externo, ancho de espaldón interno, límite de velocidad, porcentaje de camiones. Las variables más significativas fueron las pendientes de 2 categorías (1 y 5 coinciden con las pendientes menores a 2% tanto descendentes como ascendentes) cuyos valores además resultaron negativos, es decir que ocurren menos choques en estos casos.

3. Metodología

Para la realización de la investigación, se siguieron los siguientes pasos:

- Recopilación de los datos de TPDA, choques viales y geometría de la ruta por estudiar: Se utilizaron los datos de TPDA de los conteos hechos por las estaciones permanentes ubicadas a lo largo de la ruta, proporcionados por la empresa concesionaria, además de los registros de choques viales registrados por la misma y los planos post construcción. Al momento de iniciar la recopilación de datos no se obtuvo una base de datos representativa por parte de COSEVI, ya que solamente se contaba con un año de datos, por lo cual se descartó el uso de estos para el análisis.
- Procesamiento y organización de la información obtenida, utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) para ubicar espacialmente las estaciones de recuento, los choques y la geometría de la carretera, lo cual permitirá hacer un análisis espacial de la situación, dividiendo la longitud total de la carretera en tramos homogéneos. Se crearon capas con los atributos correspondientes al radio de curvatura, número de carriles, ancho de carriles, ancho de espaldón, pendiente, entre otros.
- Se procedió a determinar los tramos homogéneos según sus características geométricas (por ejemplo, tramos rectos y curvas horizontales). Estos son la unidad estadística que se utilizó para el análisis por medio de la modelación.
- Se procesó la base de datos de accidentes e incidentes en carretera, proporcionados por la concesionaria, la cual poseía datos de la ubicación, hora, severidad y características generales de cada evento. Debíó interpretarse cada uno de los campos de las características del choque para poder hacer una clasificación por tipo de choque y las posibles causas por los que se dio, pues se presentaban a modo de texto y sin uniformidad en ninguna de las entradas.
- Con los datos de accidentes georreferenciados y los tramos homogéneos definidos, se procedió a generar una base de datos con las características geométricas de los tramos, el TPDA por año de cada uno y los correspondientes choques por severidad y por año.
- Se procedió a hacer un análisis de los datos por medio de estadística descriptiva, para caracterizar los datos y conocer su comportamiento.

- Se procedió a correr los modelos Binomial Negativo o Poisson, según el mejor ajuste de cada caso particular, contemplando que las variables de cada modelo fueran representativas, para las distintas severidades de choques y el total.
- Una vez generados los modelos para cada severidad y para los totales de choques, se obtuvieron las Funciones de Desempeño. Debió hacerse el análisis por separado para la primera sección de la carretera, que tiene características de autopista, y para la segunda sección, que posee características de carretera de dos carriles.
- Utilizando las Funciones de desempeño, se aplicó el modelo Bayes Completo (*Full Bayes*) para todas las severidades. La utilización de métodos multivariados permite hacer un análisis con varias variables de manera simultánea, de manera que se toma en cuenta el efecto de todas y de cada una en presencia de las demás; además es posible trabajar con distintas muestras, es decir, distintos tipos de accidentes.
- Se aplicó el método de análisis de exceso de frecuencia de choques, para determinar los tramos con mayor cantidad de choques en relación con lo esperado. Estos resultados se obtuvieron al realizar la modelación multivariada tomando en cuenta los costos de cada severidad.
- Una vez identificados los tramos, se procedió a elaborar fichas con las características de cada tramo y de los choques que ocurrieron en cada uno, así como características observadas mediante giras de campo. A partir de las deficiencias identificadas, se procedió a generar soluciones por medio de medidas de mitigación y recomendaciones específicas para cada tramo.

En la siguiente figura se muestra un resumen de la metodología aplicada:

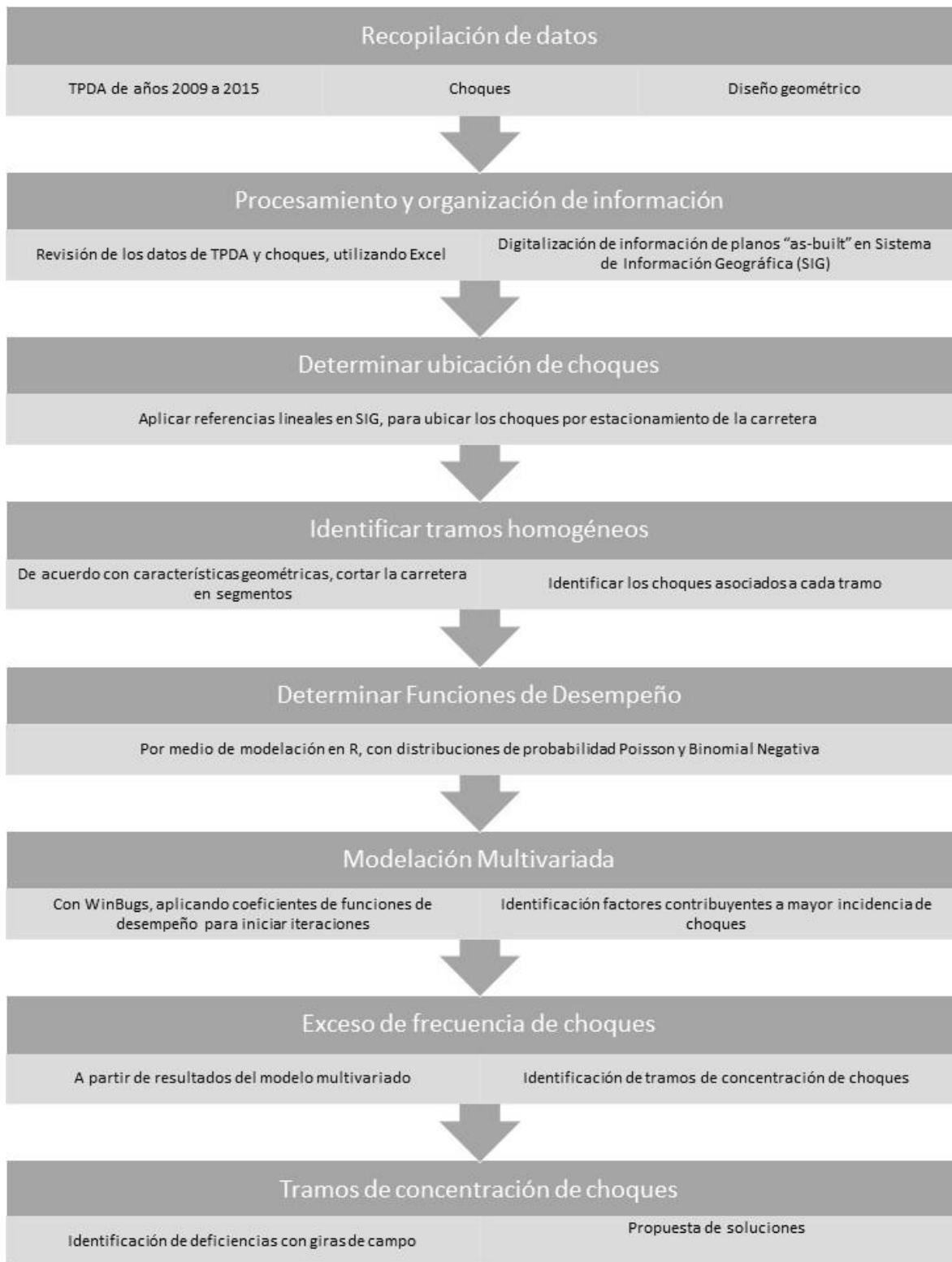


Figura 1. Metodología aplicada

4. Resultados y análisis

4.1. Procesamiento de datos

La información base obtenida, revisada y utilizada en el proyecto se describe a continuación, además se hace la descripción del procesamiento aplicado en cada caso para obtener los datos aplicables al proyecto:

4.1.1. Planos *as-built* del proyecto.

Consisten en los planos divididos en grupos de las tres secciones del proyecto, con el alineamiento horizontal, vertical y las secciones transversales que posee la ruta nacional 27. Dichos planos fueron entregados por la empresa concesionaria Globalvía.

Se llevó a cabo la georreferenciación de dichos planos, por medio del software ArcGIS 10.2, licencia estudiantil, utilizando como referencia las coordenadas desplegadas en cada plano, las cuales estaban en el sistema Lambert Norte, posteriormente se realizó la transformación de coordenadas a CRTM05 para generar la línea centro de la ruta en formato de polilínea M. Una polilínea M posee dos formas de localizar un punto: mediante coordenadas X y Y, además de utilizar la ubicación de los estacionamientos a lo largo de la línea centro de la ruta. Para generar dicha línea, se colocaron puntos georreferenciados de los estacionamientos, a cada 20 metros de acuerdo con los planos, permitiendo así mejorar la precisión y, por lo tanto, del cálculo que podrá realizar el software para ubicar los accidentes por estacionamiento a lo largo de la ruta. De esta información se utilizó para incluir en la base de datos, la definición de cada tramo con su correspondiente longitud, pendientes verticales, los radios de curvas horizontales, peraltados, velocidades límite, velocidades de diseño, número de carriles, ancho de medianeras.

4.1.2. Datos de accidentes facilitados por la concesionaria.

Se obtuvo datos completos desde febrero del 2010 hasta mayo del 2015. Los registros facilitados incluyen información de incidentes y accidentes ubicados por estacionamiento. En todos los meses y años reportados no se tiene uniformidad en las bases de datos, por lo que se debió revisar los elementos en común y uniformizar las bases de todos los años. No se posee una clasificación del tipo de accidente o sus posibles causas (esto último, puede ser interpretado de forma muy subjetiva,

por lo que se considera que no es tan crítico no contar con este dato precisamente, pues es poco confiable), en cambio, se cuenta con una descripción que incluye lo ocurrido de acuerdo con los reportes generados por los funcionarios de Globalvía, encargados de la atención en carretera y lo manifestado por los mismos usuarios en algunos casos, los cuales también son entrevistados por los mismos funcionarios. Finalmente, se tienen las columnas con los siguientes atributos:

- ID: Identificador único para cada dato, de cada año.
- PARTE: Código o número de parte asignado originalmente para cada reporte atendido. No es uniforme, pues en unos casos es numérico y en otros, alfanumérico, pero es único para cada evento.
- FECHA: en formato día/mes/año.
- HORA: en formato de 12 horas, no se cuenta con este dato para todos los meses.
- Rango hora: Variable agregada de agrupación de los datos por rango de hora de acuerdo con lo siguiente:
 1. Mañana: 5:00 am – 10:59 am
 2. Mediodía-Tarde: 11:00 am – 4:59 am
 3. Tarde-Noche: 5:00 pm – 8:59 pm
 4. Noche-Madrugada: 9:00 pm – 4:59 am
- KM, EST: Estacionamiento dado en kilómetros en el primer caso y en metros en el segundo, donde se ubica físicamente el incidente o accidente reportado.
- CANT_MORTALES: número de víctimas mortales registradas en el momento del accidente; es decir, fallecidos *in situ*.
- CANT_GRAVES: número de heridos graves, que tuvieron que ser trasladados al hospital y atendidos por lesiones que comprometían su vida.
- CANT_LEVES: número de heridos leves reportados, es decir, que no sufrieron lesiones que comprometían su vida.

En los casos en que se reportan números en cero en los tres datos anteriores y revisando las observaciones reportadas, se infiere que el accidente tuvo solo daños materiales.
- TIPO_1: De acuerdo con los datos de víctimas mortales, heridos graves o leves, por medio de una función lógica (si hay datos mayores a cero en la casilla correspondiente leves,

graves, heridos graves o víctimas mortales, se asigna el tipo correspondiente más severo ocurrido), se clasificó el tipo de accidente según su gravedad o severidad en:

- DM: Con daños materiales.
 - L: Con heridos leves.
 - G: Con heridos graves.
 - M: Con víctimas mortales.
- TIPO_2: Es la clasificación del choque por tipo, de acuerdo con la descripción de lo ocurrido y a partir de la uniformización de este dato para todos los años, se simplificó a las siguientes categorías:
 - Atropello.
 - Atropello a ciclista.
 - Caída de material.
 - Choque con animal
 - Choque frontal.
 - Choque lateral.
 - Choque motocicleta.
 - Choque múltiple (en este caso, se observaron choques múltiples por la parte posterior del vehículo, donde participaban 3 o más vehículos).
 - Choque con objeto fijo.
 - Choque posterior.
 - Derrape.
 - Falla mecánica.
 - Salida de la vía.
 - Vuelco.
 - Otro (en este caso eran choques que no tenían un reporte o descripción de lo ocurrido).
 - MOTOCICLETA: Filtro aplicado para diferenciar los choques en los que se vieron involucrados motociclistas.
 - AÑO: Filtro del año para facilitar la lectura y manejo de los datos para el análisis.

4.1.3. Volumen de tránsito

Los datos de tránsito de las estaciones permanentes reportados por la concesionaria, estos datos se dan en volumen por hora por sentido, para cada año. Las estaciones son 12, ubicadas a lo largo de la ruta, se observó que no se cuenta con la información para todos los años de análisis. En el siguiente cuadro se incluyen los datos obtenidos de acuerdo con la información que tenía disponible cada estación. En el caso de la estación 22450, se considera que los datos obtenidos para los años 2011 y 2012 no son confiables, por ser mucho menores a los que se obtuvieron para 2014 y 2015. En el caso de la estación 75400, se descartó la misma por contar solamente con un año de aforo, el 2013, dicha estación además se ubica muy cerca de la 71335. Finalmente, también se descartan los datos de la estación 31550, por estar muy cerca de la 30620 y al tener magnitudes tan diferentes entre ambas.

Se observa también en el Cuadro 1 que existe un fuerte incremento en los volúmenes entre 2009 y 2010 debido a la apertura de la carretera y la correspondiente atracción de nuevos usuarios. Se destaca el comportamiento particular de decrecimiento del volumen vehicular en algunas de las estaciones, lo cual es atípico, por lo cual se considera que es conveniente contar con estaciones instaladas por el MOPT para un control más objetivo de los volúmenes de tránsito.

Cuadro 1. Datos de estaciones permanentes de la Ruta 27

Estación	Año						
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
500	42134	59576	56694	43663	44366	44229	45880
2900	71215	158433	141183	98831	115032	106386	100795
7100	65626	93569	1563	80513	82235	84137	84792
10500	44046	76987	92878	72371	74172	74221	78201
22450			645	4610	11826	13816	15845
30620			26083	21105	23478	24883	28282
31550			6304	4234		5195	4512
41960			23403	21495	22695	23619	19170
54950			25922	19954	20527	21464	24734
62180			19054	14586	15812	16389	18385
71335					18556	19236	21661
75400					11757		

Fuente: Estaciones permanentes de Globalvía, 2009 – 2015.

Nota: Las casillas sombreadas corresponden a datos faltantes o que no siguen la tendencia del resto de años.

A partir de los datos obtenidos y mostrados en el cuadro anterior, se completaron los datos faltantes calculando una tasa de crecimiento para cada año (calculada a partir de los datos de las estaciones más cercanas y completas a las estaciones con datos faltantes), aplicada a todas las estaciones, por lo tanto, se tienen finalmente los siguientes datos finales:

Cuadro 2. Datos de TPDA calculados

Estación	Año						
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
500	42134	59576	56694	43663	44366	44229	45880
2900	71215	158433	141183	98831	115032	106386	100795
7100	65626	93569	90350	80513	82235	84137	84792
10500	44046	76987	92878	72371	74172	74221	78201
22450	7022	12274	14808	11538	11826	13816	15845
30620	12370	21621	26083	21105	23478	24883	28282
41960	11098	19399	23403	21495	22695	23619	19170
54950	15502	21487	25922	19954	20527	21464	24734
62180	9036	15794	19054	14586	15812	16389	18385
71335	11019	19260	23236	18105	18556	19236	21661

Fuente: Estaciones permanentes de Globalvía, 2009 – 2015.

4.2. Definición de tramos homogéneos

Los tramos homogéneos son aquellos que poseen las mismas características de alineamiento y sección transversal. Para poder definirlos, en primer lugar, se tomaron los datos de los planos de la ruta y se determinaron los siguientes datos, dividiendo en tramos por característica la línea centro de la carretera:

- Sección transversal: consiste en los tramos con la misma sección transversal, es decir, se dividieron los tramos por igual número de carriles, ancho de carril, ancho de espaldón, ancho de medianera (es igual a cero si no hay medianera) y para cada caso se agregó un comentario cuando hay alguna condición especial, por ejemplo, si el tramo es un intercambio o una zona de peajes, además se indicó si dentro del tramo hay un puente. Para cada tramo se anotó el estacionamiento de inicio y fin, de acuerdo con los planos, para facilitar la ubicación geográfica de los mismos posteriormente.
- Alineamiento horizontal: Se procedió a ubicar todas las curvas horizontales, de acuerdo con los planos, incluyendo la información del radio, punto de inicio y punto de fin. En el caso de

la sección 2 de la carretera, las curvas horizontales poseen curvas espirales de transición, por lo cual solamente se ingresaron los datos propiamente de las curvas circulares.

- Alineamiento vertical: Incluye todas las curvas verticales, con su punto de inicio, punto final, pendientes de entrada y salida, y el parámetro de curvatura K que es la variación de la longitud por unidad de pendiente igual a L/A (L es la longitud de la curva y A es el valor absoluto de la diferencia algebraica de las pendientes).

Superponiendo las 3 capas, se procedió a verificar los casos en que se tenía cambios fuertes en el alineamiento debido a radios muy pequeños o a pendientes muy pronunciadas, definiendo un total de 182 tramos enumerados del 0 al 181 como identificador único, el cual no necesariamente va en orden geográfico. Se separaron las curvas horizontales de los tramos rectos, en la medida de lo posible. Finalmente, a dichos tramos se les asignó el TPDA correspondiente, de acuerdo con la ubicación de las estaciones de aforo y tomando en cuenta la ubicación de las intersecciones. Cabe mencionar que, debido al procedimiento aplicado y las características intrínsecas a los tramos, estos poseen longitudes diferentes.

4.3. Distribución espacial de los accidentes

Utilizando la función de Referencias Lineales de ArcGIS 10.2, se procedió a ubicar los accidentes reportados por la concesionaria e identificarlos de acuerdo con su severidad, por tipo y por año. Debido a que los accidentes poseen una ubicación por estacionamiento, esta información se utilizó para georreferenciar los datos.

4.4. Generación de la base de datos para análisis

A partir de la georreferenciación de los planos, se definieron las distintas características geométricas de la ruta, generando distintas capas: línea de tramos con igual cantidad de carriles, igual ancho de carril y espaldón, líneas con tramos divididos por cambio en el peralte, líneas de las curvas horizontales con los correspondientes valores de radio, curvas verticales con los datos de curvatura, pendientes de entrada y salida. Finalmente, con estos datos se procedió a dividir la carretera por tramos homogéneos, es decir con características similares, extrayendo un total de 182 tramos enumerados de 0 a 181 y generando una base de datos con las siguientes variables:

- ID: Identificador único para cada tramo, este no depende de la ubicación geográfica del mismo, sino del orden en que fue creado.
- K: Curvatura.
- PEND_ENT: Pendiente de entrada a la curva vertical, dato correspondiente a la curva de mayor longitud en el tramo.
- PEND_SAL: Pendiente de salida de la curva vertical, dato correspondiente a la curva de mayor longitud en el tramo.
- RADIO: Radio de la curva horizontal. En caso de los tramos rectos, se indicó un radio de 100000 metros, para poder diferenciarlos y hacer el análisis.
- PERALTE: El peralte correspondiente de la curva horizontal.
- COMENT: Comentario donde se indica si el tramo es peaje, intercambio, posee un puente o una espiral de transición.
- CARRILES: La cantidad de carriles del tramo.
- ANCHO_CARR: El ancho de los carriles del tramo, este es prácticamente uniforme en todo el proyecto.
- ANCHO_ESP: El ancho de espaldón del tramo, el cual es uniforme en casi todo el proyecto.
- ANCHO_MED: Se asignó el ancho de mediana correspondiente a cada tramo, indicando el valor 0 en el caso en que no existiera.
- TPDA: El TPDA asignado de acuerdo con el año en que ocurrió el accidente y con la ubicación de cada tramo.

Se procedió a cruzar esta base de datos con la de accidentes, donde a cada accidente se le asignó un tramo, aplicando un *Spatial Join*, mediante el uso del ArcGIS. Mediante el uso de tablas y gráficos dinámicos en Excel se procedió a hacer un análisis para describir las características de los datos y se calculó la cantidad de accidentes por gravedad y por año para cada uno de los tramos, haciendo posteriormente una unión de tablas entre la tabla de la capa de tramos homogéneos y una tabla generada con los accidentes por gravedad y año por tramo, lo cual se cargó en el respectivo *shape*.

Esta base de datos fue modificada posteriormente, categorizando variables y reorganizando columnas para permitir realizar las modelaciones correspondientes.

4.5. Descripción de los datos procesados

Una vez generada la tabla con los datos de los accidentes, cruzada con las características geométricas de los tramos homogéneos, se procede a continuación a describir dichos datos.

Respecto a la cantidad de choques por año, se tiene que en general fueron aumentando, lo cual se puede observar en el siguiente gráfico (Figura 2). Cabe resaltar que el dato para 2015 no abarca el año completo, por lo que se decidió no tomar en cuenta este año, para no alterar los resultados del modelo que se ejecutará.

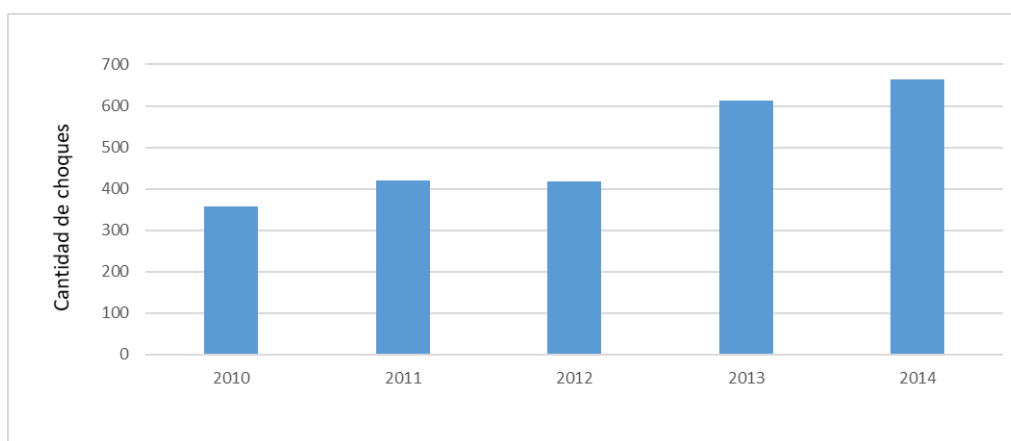


Figura 2. Cantidad de choques por año

En el siguiente gráfico se despliega para cada año, la distribución de los choques por gravedad. Se puede observar que la mayoría son choques con daños materiales. En el año 2013 se observa un incremento en la cantidad de choques con víctimas mortales, leves y con daños materiales.

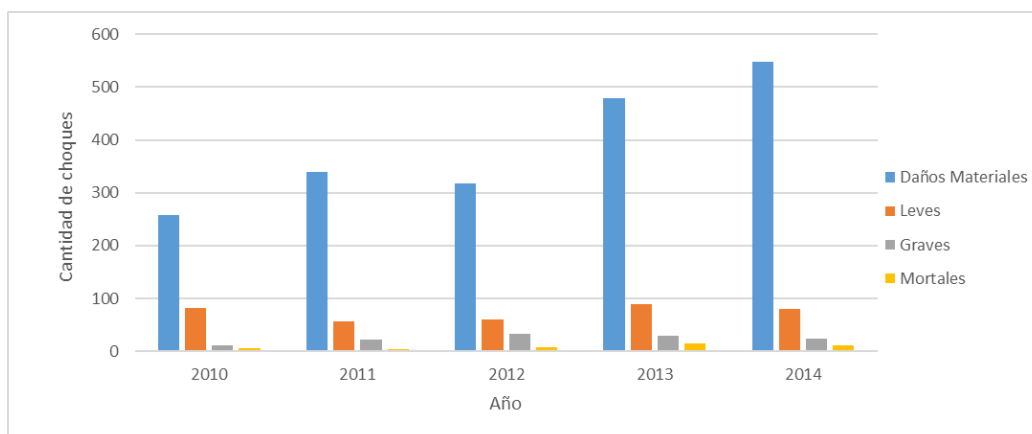


Figura 3. Cantidad de choques por gravedad y por año

La mayor parte de los choques reportados en todos los años fue del tipo choque posterior o por alcance (por el lado trasero del vehículo) además de choques múltiples (los cuales son varios vehículos chocando por atrás), choques laterales y choques con objeto fijo.

Adicionalmente, se puede observar que con los años se mejoró el reporte de los choques, pues ha disminuido la cantidad de choques del tipo "Otro", lo cual quiere decir que en la mayoría se está indicando la descripción de los mismos.

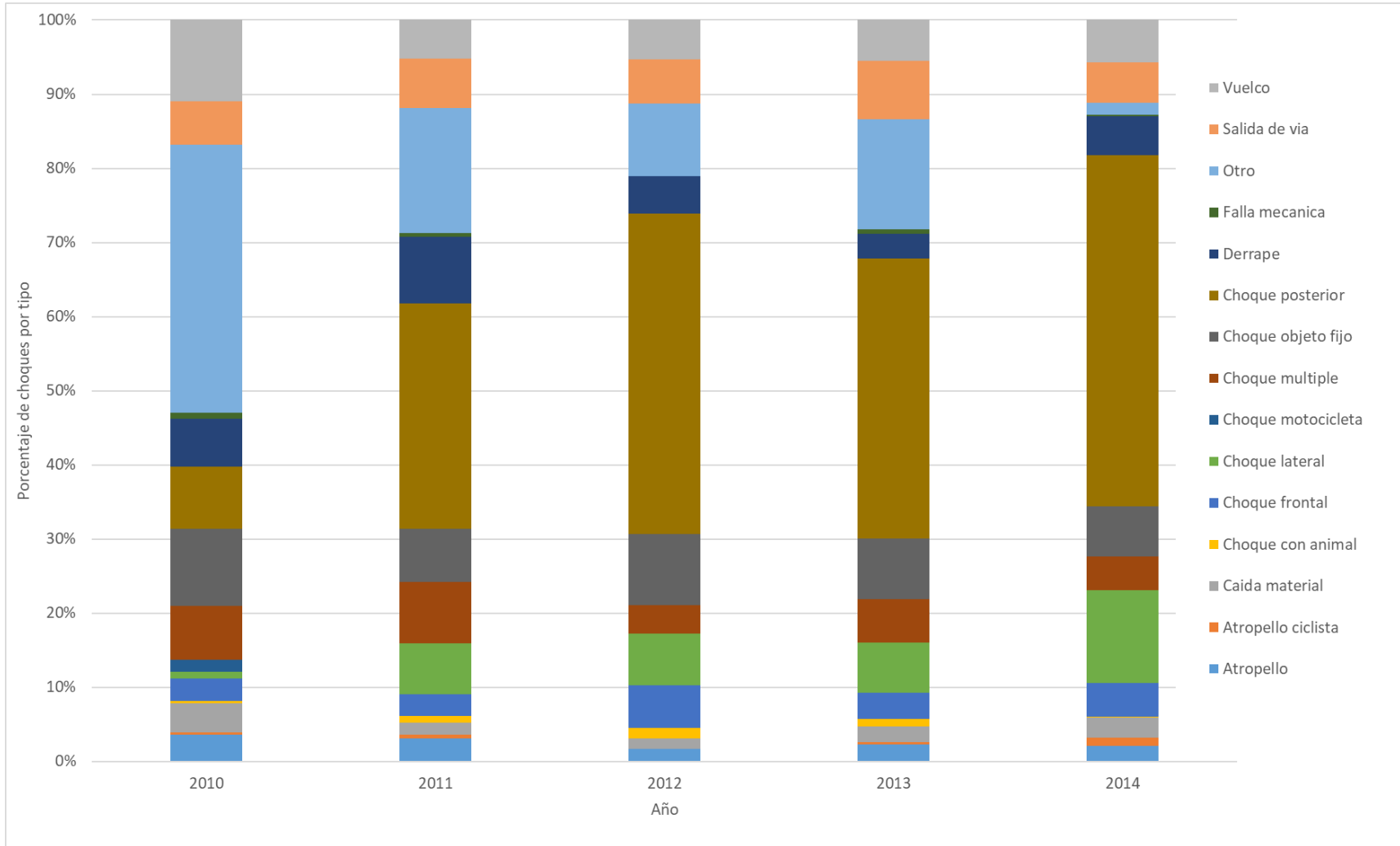
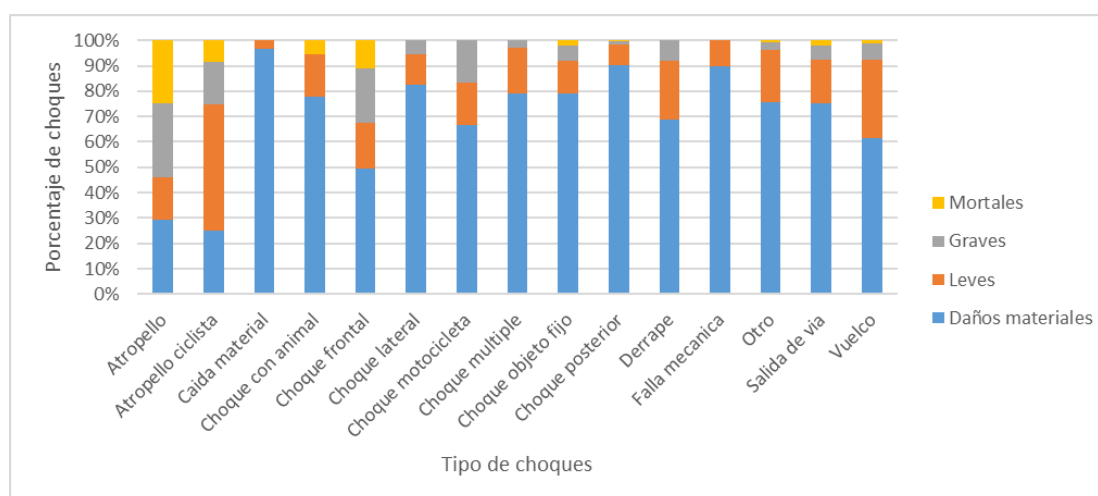


Figura 4. Porcentaje de choques por tipo y por año

Cuadro 3. Cantidad de choques por tipo y por año

Tipo	Año				
	2010	2011	2012	2013	2014
Atropello	13	13	7	14	14
Atropello ciclista	1	2		2	7
Caída material	14	7	6	13	18
Choque con animal	1	4	6	6	1
Choque frontal	11	12	24	22	30
Choque lateral	3	29	29	41	83
Choque motocicleta	6				
Choque múltiple	26	35	16	36	30
Choque objeto fijo	37	30	40	50	45
Choque posterior	30	128	181	232	314
Derrape	23	38	21	20	35
Falla mecánica	3	2		4	1
Otro	129	71	41	91	11
Salida de vía	21	28	25	48	36
Vuelco	39	22	22	34	38

De acuerdo con los registros, los choques con daños materiales representan el mayor porcentaje para la mayoría de los tipos de choque, excepto para los atropellos y atropellos a ciclistas que son más severos, evidenciando la vulnerabilidad de estos usuarios ante los choques viales. Por otro lado, se tiene que los atropellos a ciclistas y los choques frontales poseen más del 10% de choques con víctimas mortales.

**Figura 5. Porcentaje de choques por gravedad y por tipo**

Finalmente, en cuanto a la base de datos de choques, se tiene que para los periodos que fueron definidos, la mayor cantidad se presenta entre las 9:00 am y 4:00 pm, las cuales contienen el pico de la mañana y del mediodía, entre los que se tiene muy poca variación en la primera sección de la carretera, seguido del periodo pico de la tarde, entre 4:00 pm y 7:00 pm. Por otra parte, la cantidad de accidentes disminuye entre 6:00 am y 9:00 am, horas pico de la mañana, con alto porcentaje de choques con solo daños materiales. La mayor cantidad de choques con víctimas mortales se da desde las 4:00 pm hasta las 6:00 am.

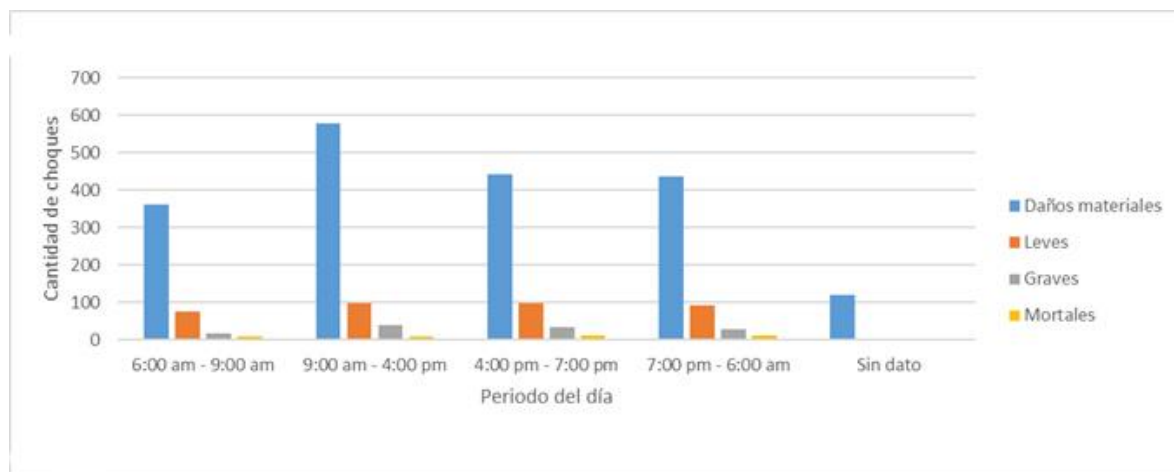


Figura 6. Cantidad de choques por gravedad y por periodo del día

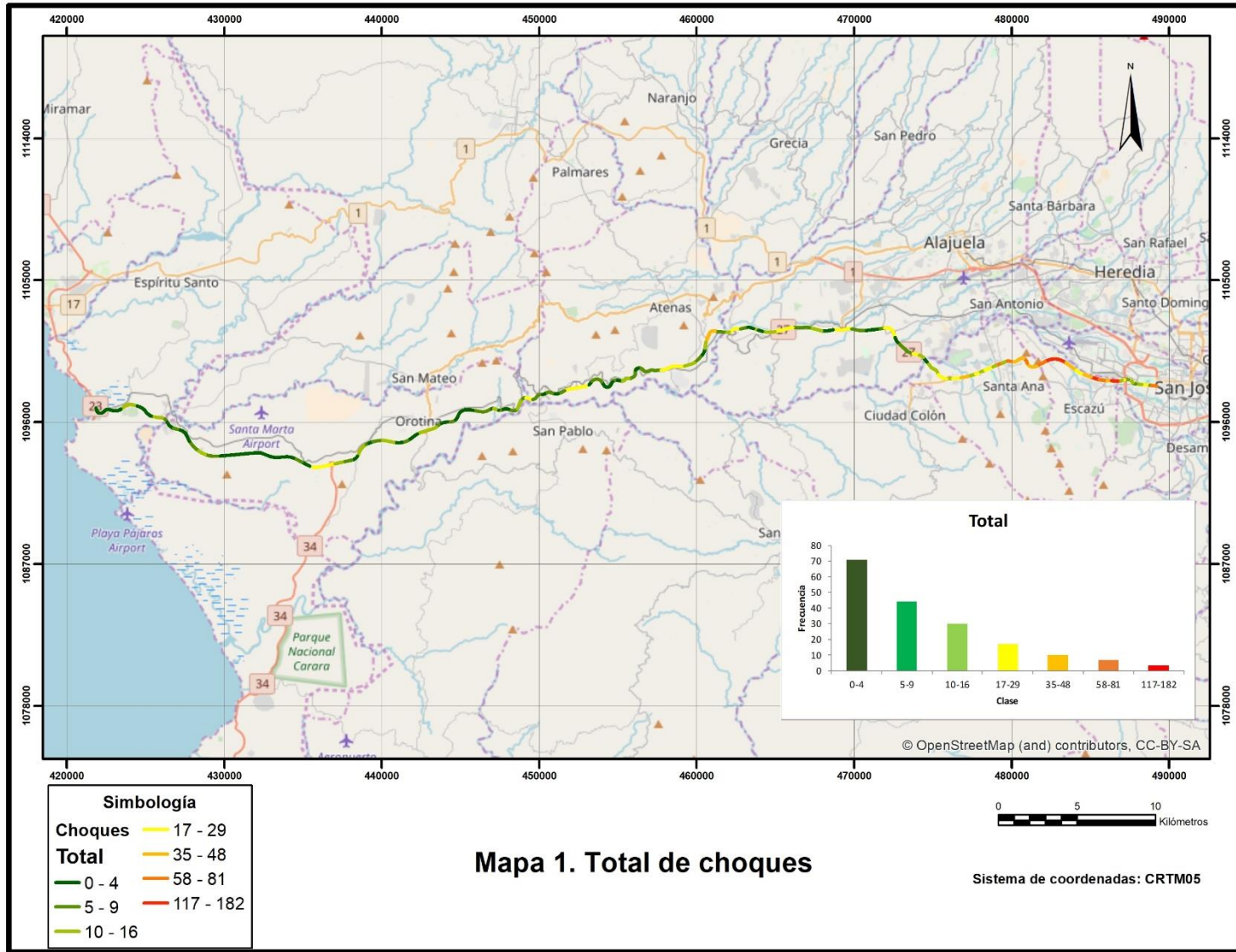
4.6. Estadística descriptiva de las variables

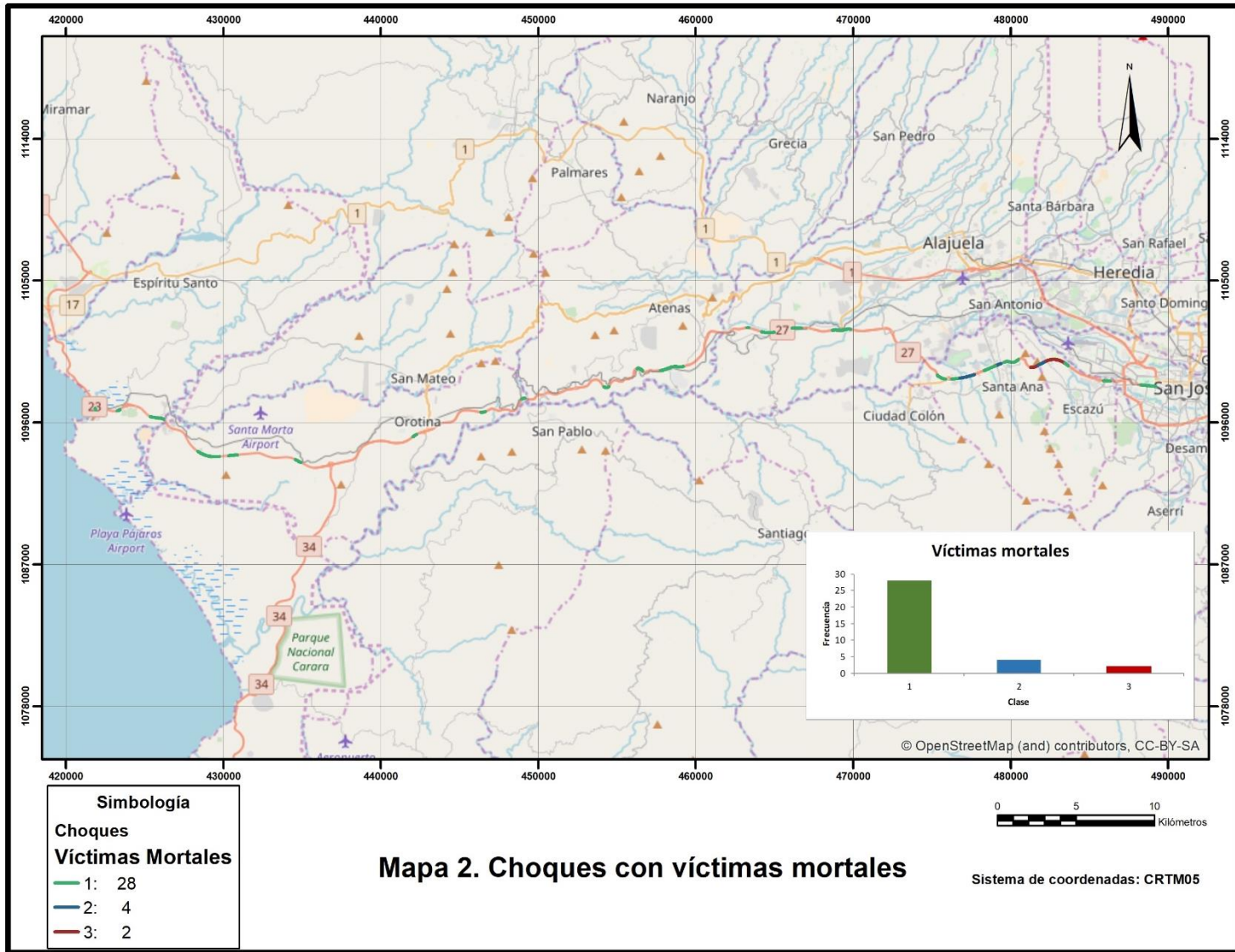
En primer lugar, se definen como variables dependientes, todos los choques por gravedad y por año. Por otra parte, las variables independientes serán las características geométricas y de tránsito de los tramos homogéneos. Para cada variable independiente se determinó su promedio, mediana, desviación estándar, valor máximo y mínimo, así como los histogramas de las mismas.

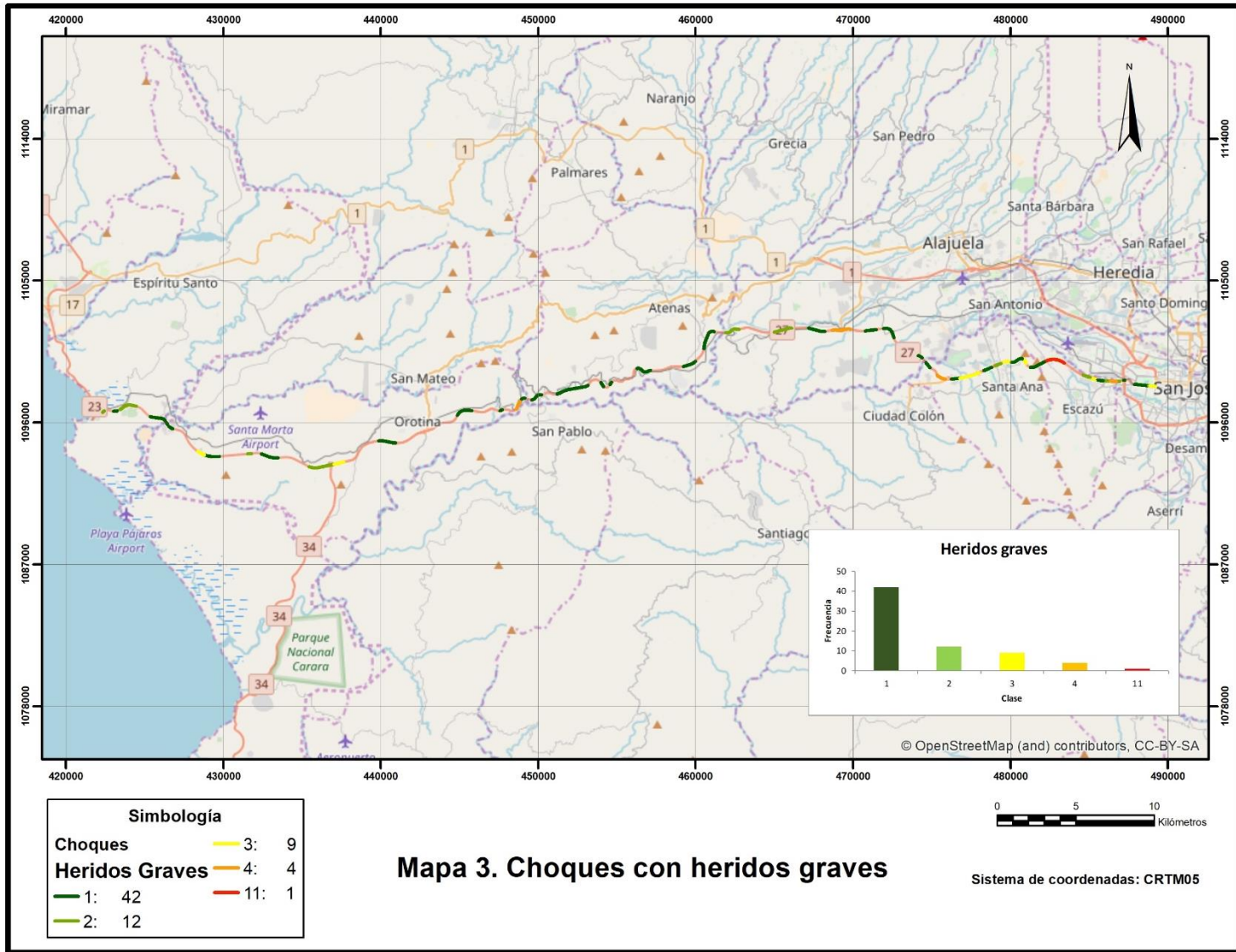
Las variables dependientes definidas son los choques por gravedad y por año, cuyos estadísticos descriptivos se indican en el Cuadro 4. En los mapas 1 a 5 se muestra la distribución espacial de los choques totales y por gravedad, incluyendo los histogramas de los mismos. De lo que se puede observar en los histogramas, la distribución de probabilidad de estas variables, se asemejan a la forma de la distribución Geométrica, la cual es un caso particular de la distribución Binomial Negativa. De los mapas se observa, que los choques más severos ocurren en su mayoría en los alrededores de las zonas de Santa Ana y Escazú.

Cuadro 4. Estadística descriptiva de variables dependientes totales y por año

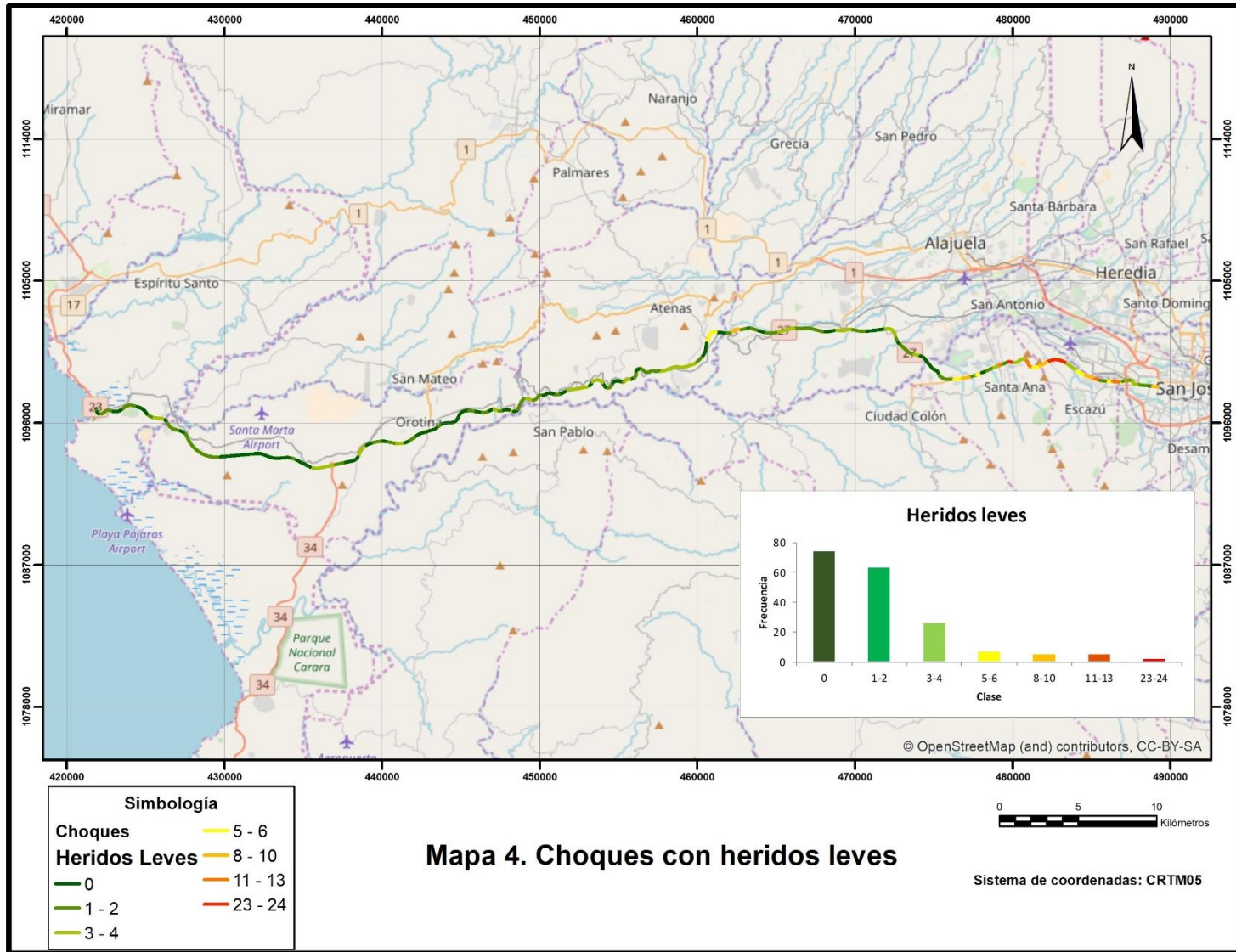
Variable	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar
Daños Materiales	0,00	168,00	10,68	18,78
Leves	0,00	24,00	2,02	3,44
Graves	0,00	11,00	0,66	1,24
Mortales	0,00	3,00	0,23	0,54
Total de choques	0,00	182,00	13,58	22,25
Daños Materiales 2010	0,00	18,00	1,42	2,37
Leves 2010	0,00	4,00	0,45	0,86
Graves 2010	0,00	2,00	0,07	0,27
Mortales 2010	0,00	2,00	0,03	0,23
Total de choques 2010	0,00	21,00	1,96	3,03
Daños Materiales 2011	0,00	39,00	1,87	3,93
Leves 2011	0,00	6,00	0,31	0,91
Graves 2011	0,00	5,00	0,12	0,50
Mortales 2011	0,00	1,00	0,02	0,13
Total de choques 2011	0,00	41,00	2,31	4,60
Daños Materiales 2012	0,00	29,00	1,75	3,50
Leves 2012	0,00	5,00	0,33	0,70
Graves 2012	0,00	2,00	0,18	0,44
Mortales 2012	0,00	2,00	0,04	0,23
Total de choques 2012	0,00	32,00	2,30	4,19
Daños Materiales 2013	0,00	40,00	2,63	4,99
Leves 2013	0,00	7,00	0,49	1,11
Graves 2013	0,00	2,00	0,16	0,43
Mortales 2013	0,00	1,00	0,08	0,27
Total de choques 2013	0,00	42,00	3,37	5,89
Daños Materiales 2014	0,00	45,00	3,01	5,40
Leves 2014	0,00	6,00	0,44	0,88
Graves 2014	0,00	2,00	0,13	0,37
Mortales 2014	0,00	1,00	0,06	0,24
Total de choques 2014	0,00	48,00	3,64	6,05

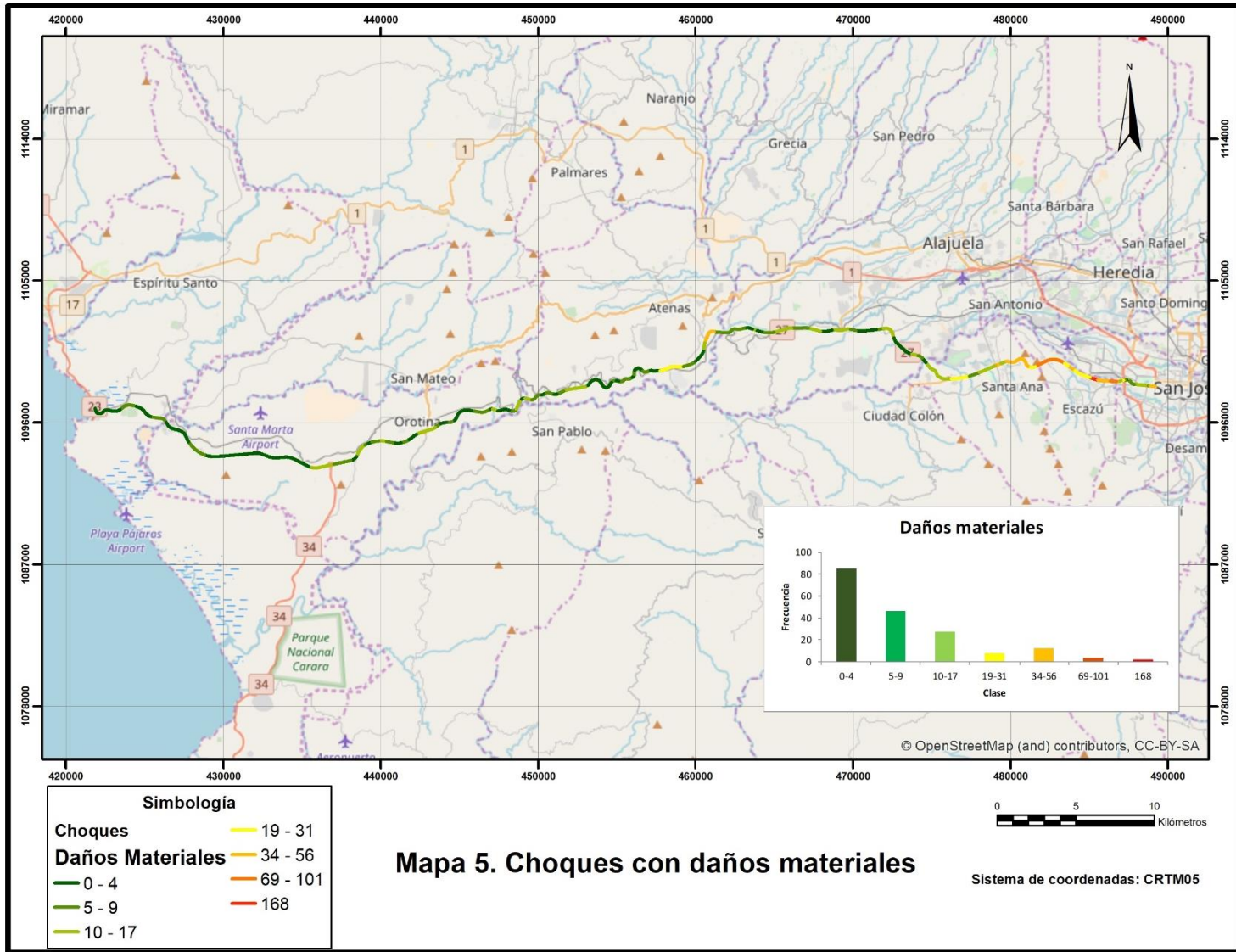






Mapa 3. Choques con heridos graves





Cuadro 5. Estadística descriptiva de las variables independientes

Variable	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
TPDA	11538,00	158433,00	66708,53	38869,21
Número de carriles	2,00	17,00	4,92	3,92
Ancho de carril (m)	3,00	3,65	3,58	0,20
Ancho de espaldón (m)	1,20	1,80	1,72	0,14
Ancho de mediana (m)	0,00	7,00	2,82	2,92
K	0,00	968,06	67,17	112,23
Pendiente de entrada (%)	-0,07	0,06	-0,03	0,04
Pendiente de salida (%)	-0,07	0,06	-0,02	0,04
Radio (m)	210,00	100000,00	11473,21	30177,70
Peralte (%)	1,50	10,00	4,36	2,60

En el Cuadro 5 se muestra la estadística descriptiva de las variables independientes y en los mapas 6 a 15, se muestra en detalle cada una de estas, que consisten en las características de los tramos homogéneos definidos: TPDA, tipo de tramo, número de carriles, ancho de espaldón, ancho de mediana, peralte, radio, pendiente longitudinal y curvatura. Respecto a cada variable se tiene las siguientes observaciones en el orden de cada uno de los mapas:

- TPDA del año 2014: Se toma como ejemplo el TPDA del último año completo de datos. En el Mapa 6 se puede observar que los tramos con TPDA más alto están entre Escazú y La Guácima, seguidos del tramo entre Atenas y Orotina.
- Tipo de sección: El 79% de la longitud total de la carretera corresponde a secciones tipo “normal”, es decir que no contienen ningún tipo de estructura particular en comparación con los otros tramos; dentro de estos tramos se incluyeron los que contienen “espirales”, los cuales se muestran en el Mapa 7 y solamente se encuentran en la Sección II de la carretera. El 18% de la longitud corresponden a tramos con un intercambio, los cuales contienen rampas, medianera y 4 carriles con transiciones a 2 carriles. Apenas el 3% de la longitud total consiste de tramos con peajes, los cuales contienen 6 o más carriles y anchos de espaldón y carril menores que en los otros tramos.
- Número de carriles: El 43% de la longitud total corresponde a tramos de 2 carriles, lo que corresponde a la mayor parte de la carretera, especialmente entre las Secciones II y III, como se puede ver en el Mapa 8; el 14% posee carril de ascenso o adelantamiento; el 37% se concentra entre la Sección I entre San José y Ciudad Colón, así como los intercambios. Los tramos con 6 o más carriles corresponden a un 6% de la longitud y coinciden en su mayoría con los tramos con peajes o algunos segmentos de intercambios.
- Ancho de espaldón: Prácticamente todo el proyecto contiene espaldones de 1,8 metros de ancho, como se observa en el Mapa 9, mientras que apenas el 7% de la longitud total posee espaldones menores a este ancho.

- Ancho de mediana: En el Mapa 10 se puede ver que el mayor porcentaje de longitud del proyecto (59%) corresponde a tramos sin medianera, en el resto hay medianas angostas con barrera divisoria tipo *New Jersey* (aproximadamente 10%) y medianeras con zona verde (31%).
- Peralte de curvas horizontales: Tomando 6 rangos de valores, que se muestran en el Mapa 11, se puede observar que la mayoría de los tramos (34% de la longitud) poseen un peralte de menos del 3%, es decir que existen tramos que tienen peraltes muy bajos, sin embargo, esto está ligado al radio de estas curvas, las cuales probablemente poseen radios mucho mayores al mínimo.

Para la selección de los rangos, se utilizó el método de clasificación *Natural Breaks (Jenks)* o “Cortes naturales” que se basan en las agrupaciones naturales inherentes a los datos; estos se caracterizan porque agrupan mejor los valores similares y maximizan las diferencias entre clases. Las entidades se dividen en clases cuyos límites quedan establecidos donde hay diferencias considerables entre los valores de los datos (Esri, 2019).

- Radio de curvas horizontales: La mayoría de los radios son bastante amplios, sin embargo, existen radios menores a los mínimos de diseño, esto se muestra con detalle en el Mapa 12. Por ejemplo, en la Sección I (San José – Ciudad Colón) se utilizaron 2 velocidades de diseño 100 km/h y 80 km/h en algunos tramos, lo que implica que los radios mínimos de diseño son 395 m y 240 m respectivamente, sin embargo, en este hay varios tramos con radios entre 210 m y 300 m.
- Pendientes de tangentes verticales: De los tramos que corresponden a tangentes verticales, el 39% de la longitud total de los mismos corresponde a pendientes entre 4,32% y 7,42%. Ver Mapa 13.

Como se puede ver en el Cuadro 6, las tangentes verticales representan un 24,5% del total de la carretera, siendo que la mayor parte de la carretera está compuesta por curvas en columpio, es decir, un 51,1% de la longitud total.

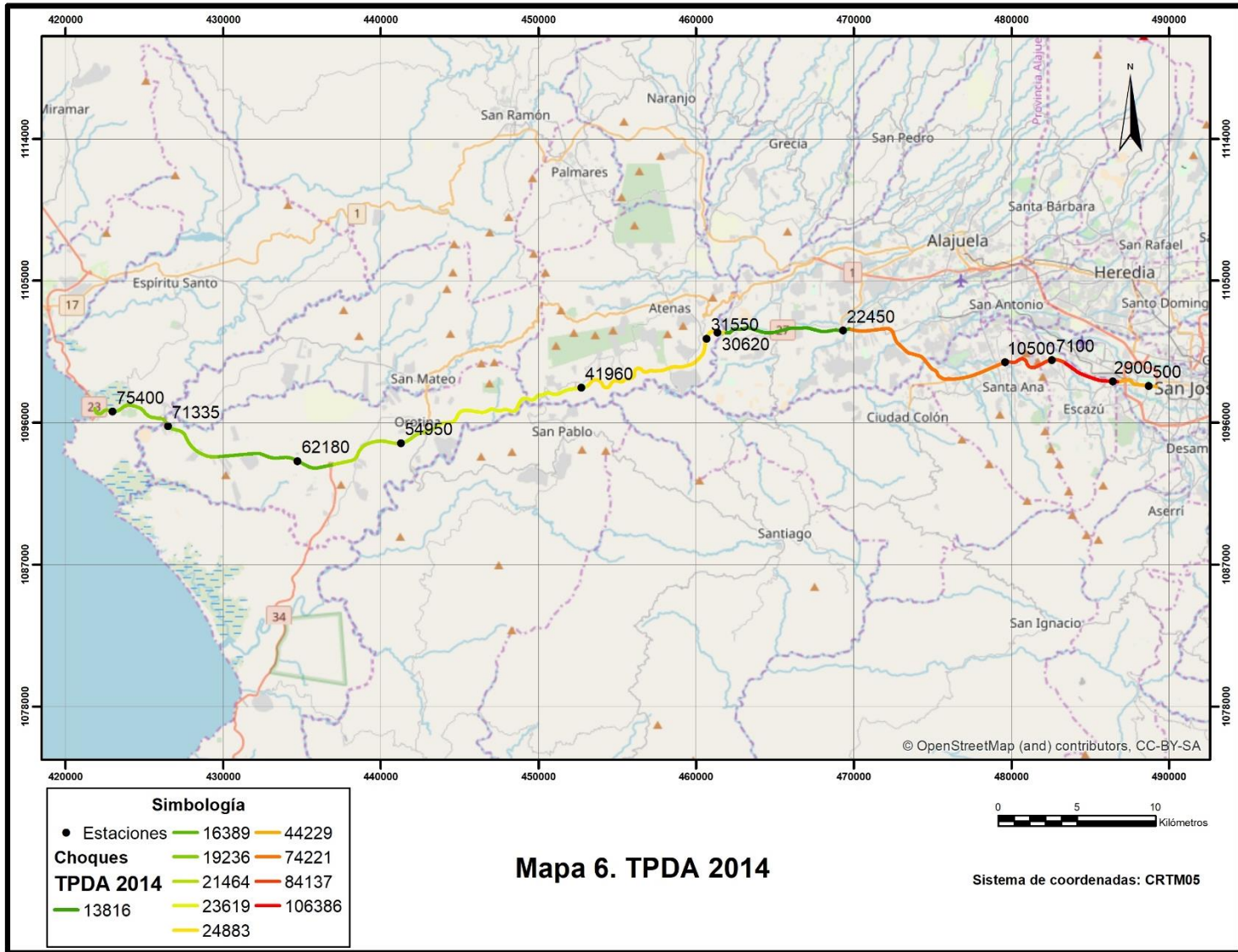
Cuadro 6. Tipo de tramo según alineamiento vertical

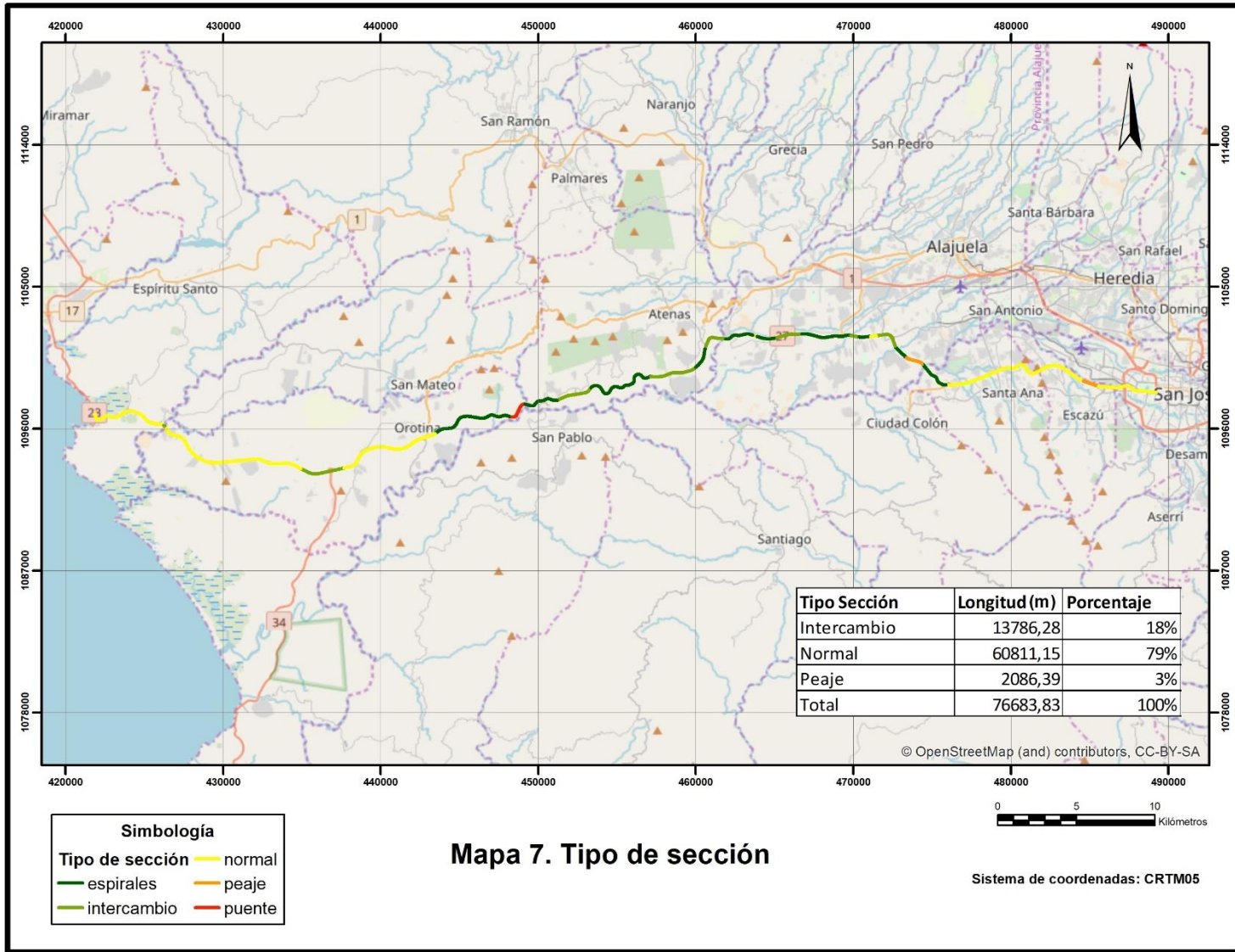
Tipo	Longitud (m)	Porcentaje
Columpio	39210,72	51,1%
Cresta	18708,28	24,4%
Tangente	18764,83	24,5%
Total	76683,83	100,0%

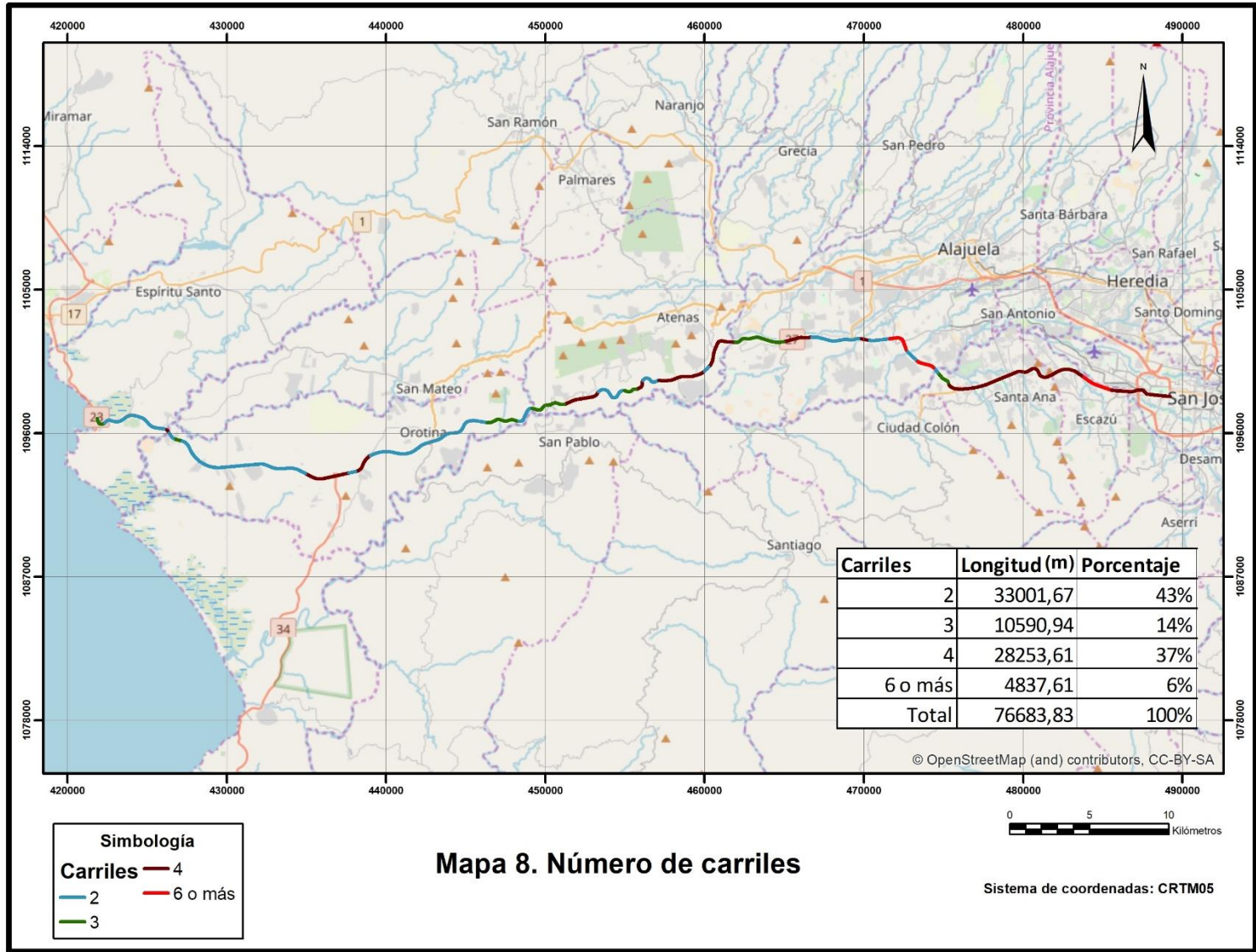
- K de curvas verticales: Se tiene que para una velocidad de diseño de 100 km/h, el K mínimo en curvas en cresta es de 62 y en columpio de 37 (de acuerdo con lámina de parámetros de diseño de la Sección I). Para la ruta 27 se tiene valores de K mínimo en columpio de 19,61 y

en cresta de 27,4 de acuerdo con lo obtenido en los planos de alineamiento vertical. Ver Mapa 14.

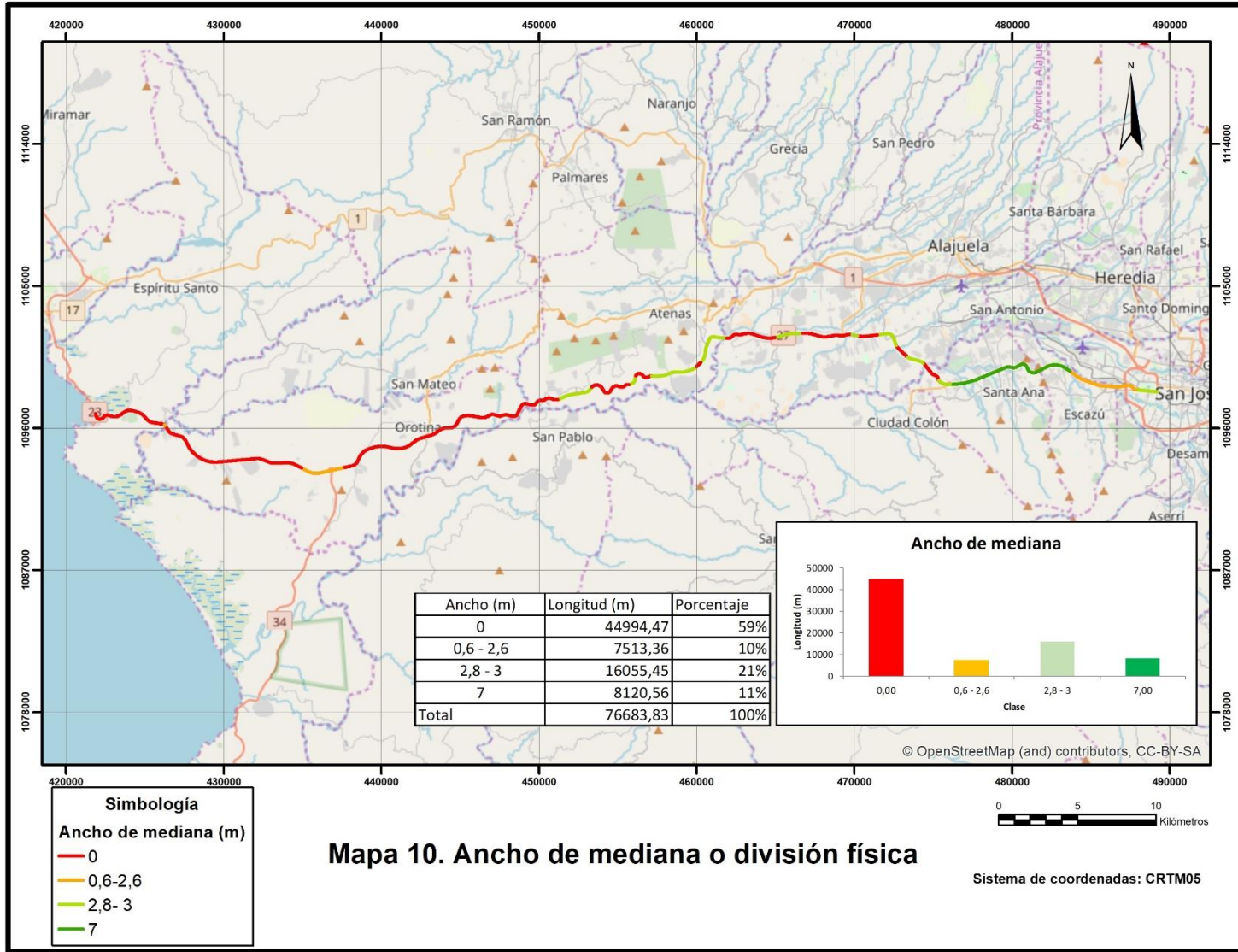
- Velocidad límite: La velocidad límite en la mayoría de la carretera es de 80 km/h, pero en tramos de peaje es de 40 km/h, en algunas transiciones en las zonas de peaje es 60 km/h y 100 km/h en algunos tramos de la Sección I que tiene más características de autopista, como se puede observar en el Mapa 15. Cabe señalar que la velocidad de diseño es de 100 km/h en las Secciones I y III, mientras que en la Sección II es de 80 km/h.

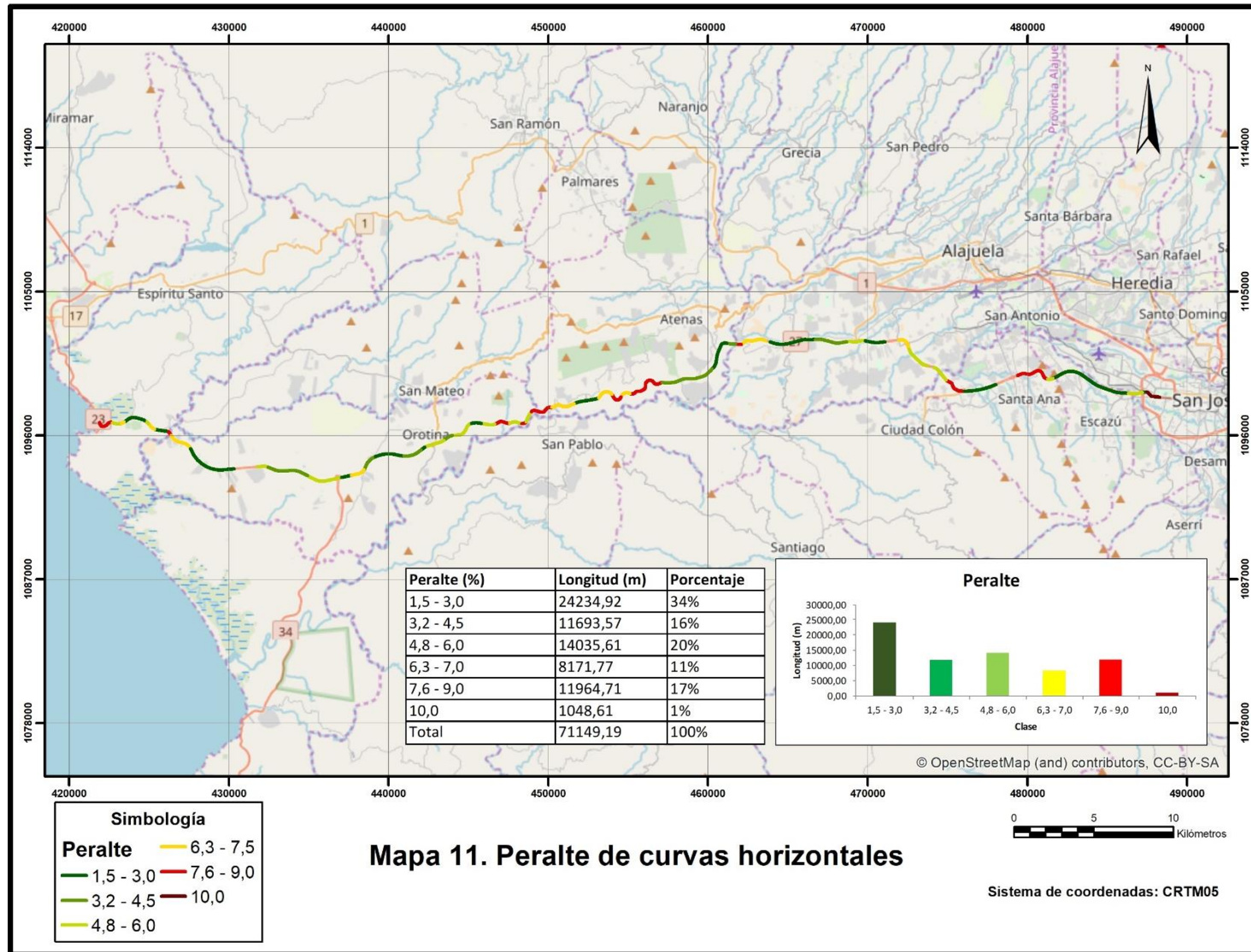


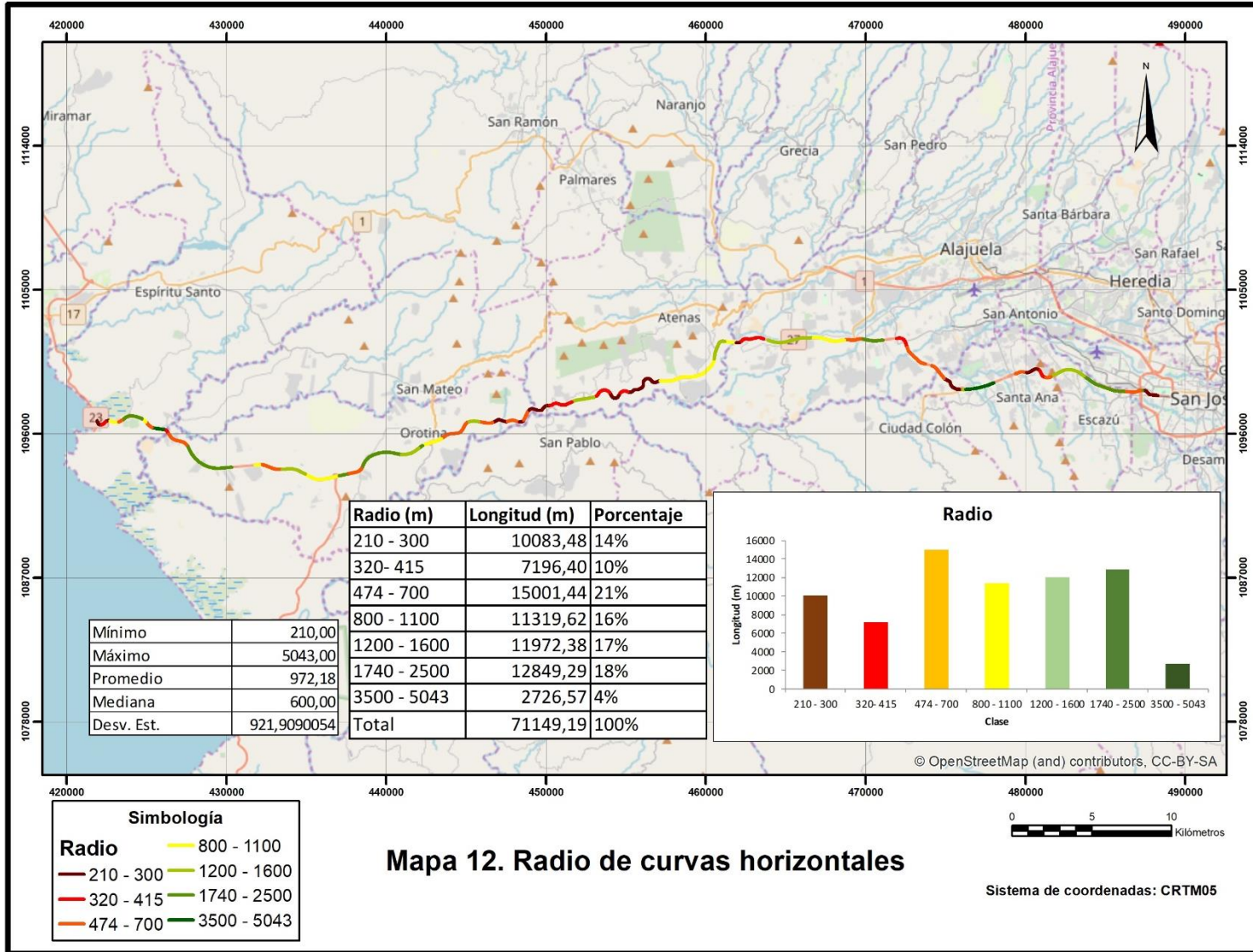




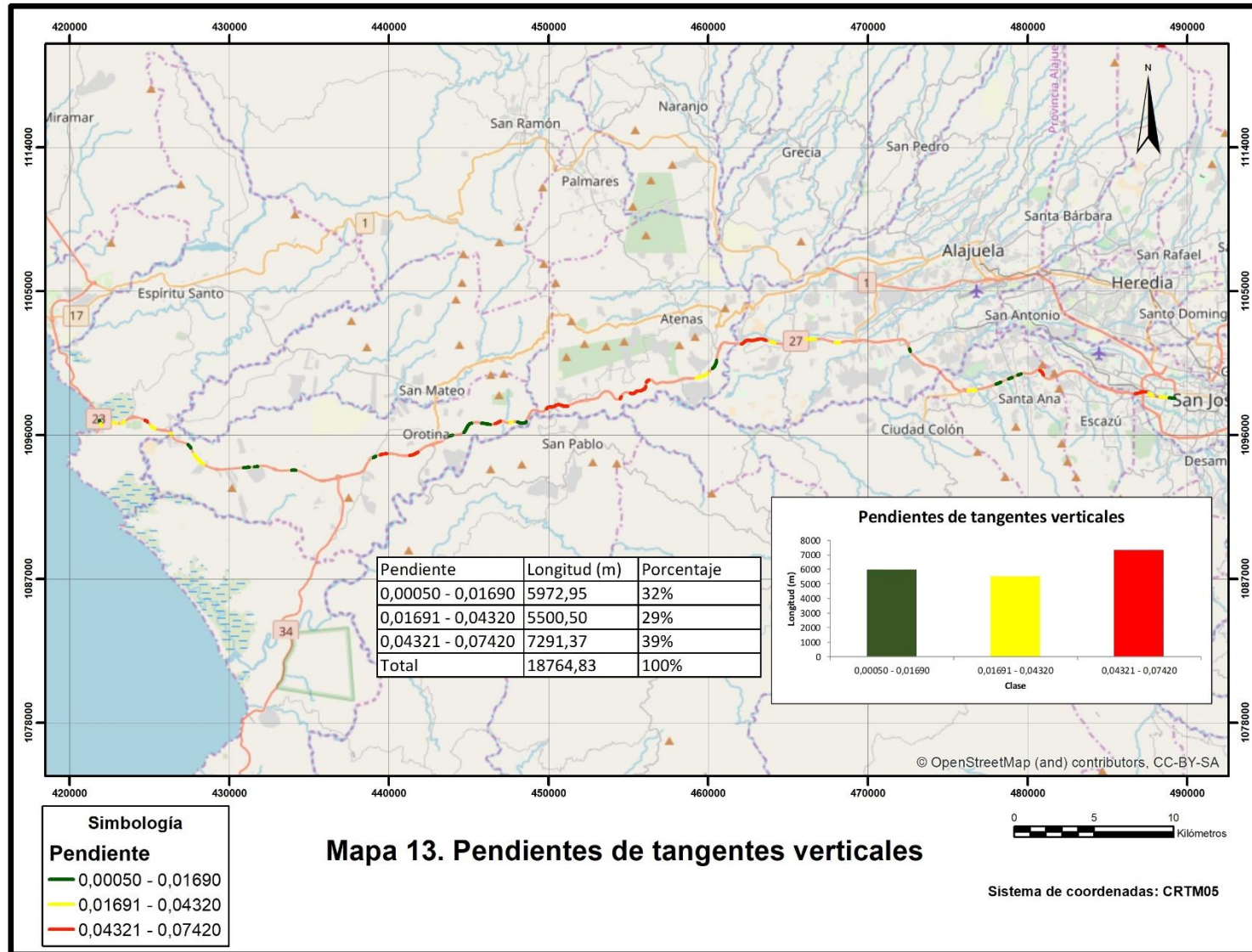


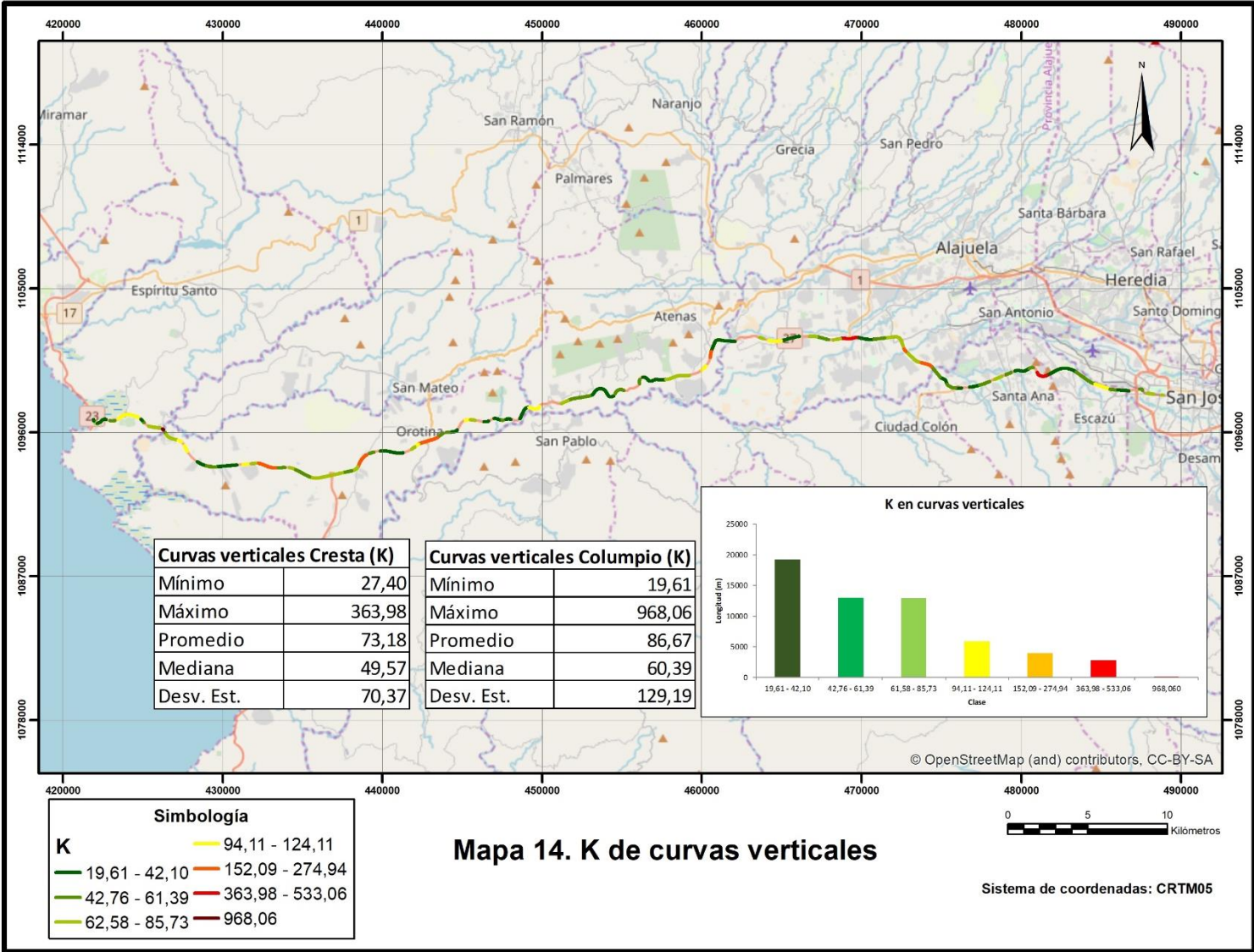


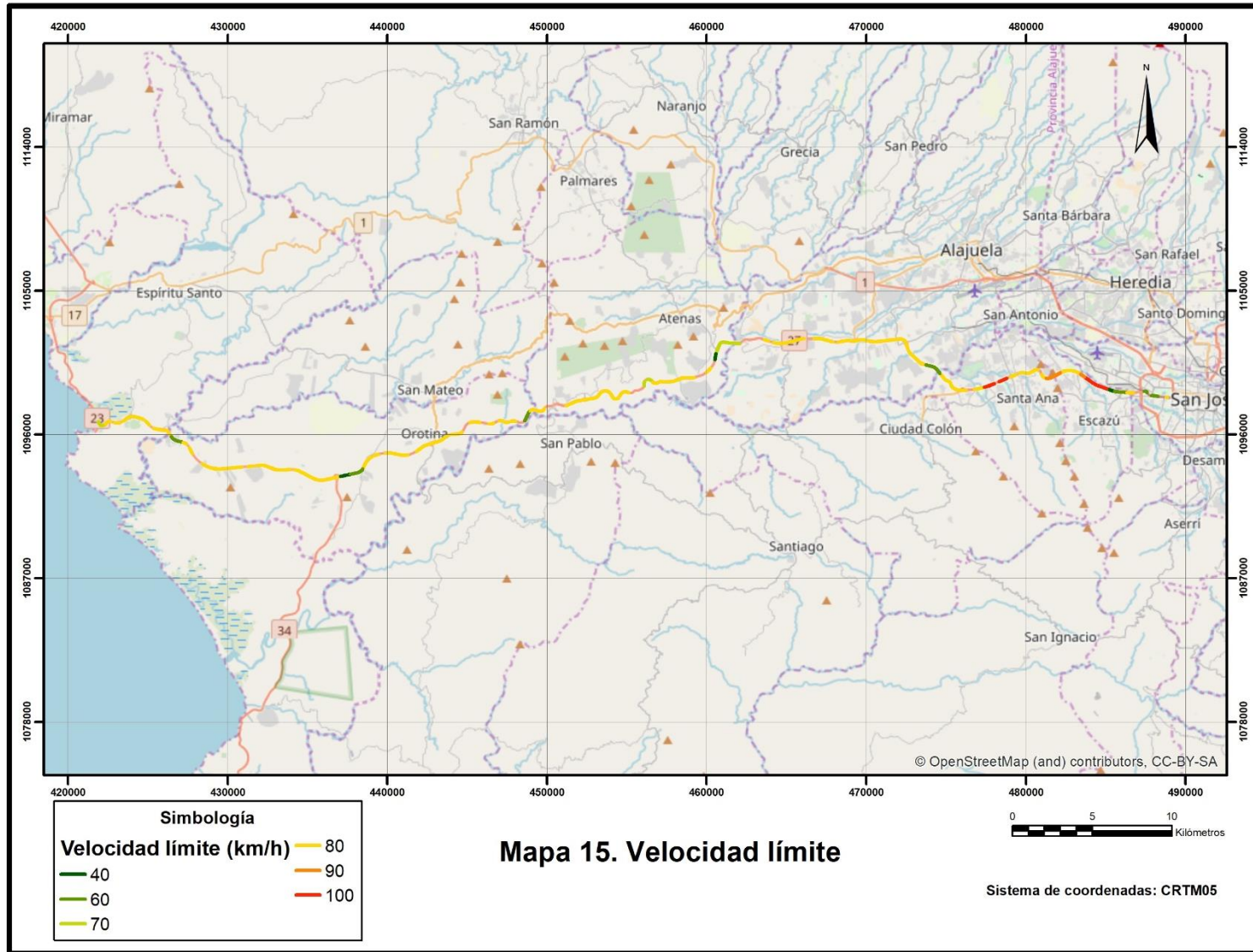




Mapa 12. Radio de curvas horizontales







5. Modelación

5.1. Funciones de desempeño

Una vez preparada la base de datos, se procedió a modelar en el software R mediante la interfaz RStudio, en primer lugar, todos los tramos de la carretera, probando el ajuste de probabilidad Binomial Negativa. Se procedió a incorporar variable por variable, sin embargo, no se logró obtener modelos apropiados, que contuvieran las variables representativas y que tuvieran un indicador bueno de χ^2 . Por lo tanto, se dividió la base de datos en los tramos homogéneos correspondientes a la Sección I, que tiene las características de una autopista y el resto de la ruta correspondiente a la carretera de 2 carriles (que posee carriles de ascenso y adelantamiento e intercambios con ampliaciones a 4 carriles).

Se realizaron varias pruebas, de forma que se determinó la reclasificación de algunas variables, como por ejemplo los rangos de los radios, de K y pendientes; posteriormente, se procedió a dividir en autopista y carretera de 2 carriles, para finalmente ver en cada caso el comportamiento de las variables y ver la necesidad nuevamente de reclasificación.

Para verificar la validez de los modelos, se procedió a incorporar las variables una a una, calculando la razón del logaritmo de la probabilidad (Log-Likelihood ratio); donde se tiene como hipótesis nula (H_0) el modelo reducido es verdadero y la alternativa (H_A) como el modelo aumentado es verdadero (PennState Eberly College of Science, 2018), entonces la razón se calcula como:

$$\Delta G^2 = -2\log L \text{ modelo reducido} - (-2\log L \text{ modelo aumentado}) \quad (13)$$

Donde ΔG^2 es la diferencia del estadístico de bondad de ajuste total del modelo reducido y el modelo aumentado.

Posterior al cálculo descrito anteriormente, se aplicó al resultado la prueba de χ^2 , tomando como valor máximo la probabilidad de 0,025 para tomar un modelo como válido. La variable agregada respecto al modelo precedente, equivale a 1 grado de libertad.

Si al aplicar la prueba se obtiene una probabilidad de 0,025 o menos, eso implica que el modelo aumentado es verdadero, de lo contrario, el modelo reducido es verdadero, por lo cual se concluye que la variable agregada no es representativa.

Lo anterior se hizo para el total de accidentes y posteriormente para cada severidad. Se utilizó en primera instancia el modelo Binomial Negativo, pero en los casos en que no se obtenía resultados lógicos (especialmente al analizar por severidad) se debió optar por aplicar Poisson, específicamente en los casos de heridos graves y con víctimas mortales, por tener menor cantidad de eventos.

De esta forma, se obtuvieron los modelos que se describen en los puntos a continuación, para ambos tipos de carretera.

Autopista

En el caso de la sección clasificada como autopista, se realizó la modelación por severidad, haciendo pruebas tanto con Binomial Negativo, como con Poisson. Los resultados que se ajustaron mejor, se presentan en los cuadros siguientes. Es importante resaltar, que las variables representativas, que son las mostradas en los cuadros correspondientes, fueron tomadas como base para las corridas de los modelos Multivariados.

En el modelo de choques totales, se obtuvieron como variables, la cantidad de carriles de 6 o más (tomando como base 4 carriles), espaldones de 1,8 metros (tomando como base los espaldones de ancho menor a 1,8 metros) y la velocidad límite (con base de 40 y 60 km/h); siendo todas estas variables muy significativas. Hay mayor probabilidad de choques cuando las velocidades límite son menores y cuando hay más carriles (en intercambios y peajes), mientras que la probabilidad disminuye con espaldones anchos y en los tramos con velocidad límite de 100 km/h. Con esto se destaca la importancia de que los espaldones de una carretera posean un ancho de 1,8 metros. Por otro lado, en los tramos de mayor velocidad, se tiene condiciones muy uniformes, sin embargo, al acercarse a un intercambio o peaje, se introduce de manera repentina cambios en la condición geométrica, por lo que los conductores pueden experimentar incertidumbre, ocurriendo choques por alcance e inclusive se puede presentar condiciones que provoquen salidas de la vía o derrapes.

Cuadro 7. Resultado de modelo Poisson, total de choques

Variable	Estimado	Error estándar	z	Pr(> z)
Constante	-3.56586	0.97568	-3.655	0.000257
log(TPDA)	-0.01084	0.08691	-0.125	0.900702
4 carriles (Base)	-	-	-	-
6 o más carriles	0.84264	0.10518	8.011	1.13e-15
Espaldones de menos de 1,8 metros (Base)	-	-	-	-
Espaldón de 1,8 metros	-0.77084	0.07776	-9.913	< 2e-16
Velocidad límite 40 y 60 km/h (Base)	-	-	-	-
Velocidad límite 80 km/h	0.59740	0.08721	6.850	7.36e-12
Velocidad límite 90 km/h	0.74338	0.12417	5.987	2.14e-09
Velocidad límite 100 km/h	-1.16756	0.10303	-11.332	< 2e-16
Grados de libertad				183
Desviación residual				554.88
AIC				1210.7
2 x log-probabilidad				554.88
Chi ²				2.698998e-76

El modelo de daños materiales tiene las mismas variables que el anterior, pero además contiene la variable del radio de la curva horizontal, tomando como base para esta, los tramos en tangente. El comportamiento de las variables es similar al caso anterior. La probabilidad de choques en curvas es mayor en los tramos con radios entre 700 y 320 metros, pero es menor en tramos de radios en los extremos menor y mayor.

Cuadro 8. Resultado de modelo Poisson, daños materiales

Variable	Estimado	Error estándar	z	Pr(> z)
Constante	-4.57665	1.17164	-3.906	9.38e-05
log(TPDA)	0.09915	0.10660	0.930	0.352284
4 carriles (Base)	-	-	-	-
6 o más carriles	1.04563	0.11959	8.743	< 2e-16
Espaldones de menos de 1,8 metros (Base)	-	-	-	-
Espaldón de 1,8 metros	-0.81184	0.09932	-8.174	2.98e-16
Tangente (Base)	-	-	-	-
Radio entre 5043 y 1740 metros	-0.48857	0.13314	-3.669	0.000243
Radio entre 1600 y 800 metros	-0.35209	0.12797	-2.751	0.005937
Radio entre 700 y 320 metros	-0.08467	0.11323	-0.748	0.454616
Radio entre 300 y 200 metros	-0.47286	0.13345	-3.543	0.000395
Velocidad límite 40 y 60 km/h (Base)	-	-	-	-
Velocidad límite 80 km/h	0.32773	0.12419	2.639	0.008320
Velocidad límite 90 km/h	0.63119	0.17671	3.572	0.000354
Velocidad límite 100 km/h	-1.41765	0.11327	-12.516	< 2e-16
Grados de libertad				179
Desviación residual				520.32
AIC				1127.3
2 x log-probabilidad				520.32
Chi ²				4.491057e-82

En el caso de los choques con heridos leves, las variables son la velocidad límite, siendo más significativa la de 100 km/h y el radio de curva horizontal, principalmente entre 700 y 320 metros.

Cuadro 9. Resultado de modelo Poisson, heridos leves

Variable	Estimado	Error estándar	z	Pr(> z)
Constante	-6.96841	2.78267	-2.504	0.01227
log(TPDA)	0.10408	0.25232	0.413	0.67997
Velocidad límite 40 y 60 km/h (Base)	-	-	-	-
Velocidad límite 80 km/h	-0.04164	0.21913	-0.190	0.84929
Velocidad límite 90 km/h	-0.53581	0.34847	-1.538	0.12414
Velocidad límite 100 km/h	-0.63678	0.26747	-2.381	0.01728
Tangente (Base)	-	-	-	-
Radio entre 5043 y 1740 metros	0.06013	0.27082	0.222	0.82430
Radio entre 1600 y 800 metros	0.24616	0.28248	0.871	0.38352
Radio entre 700 y 320 metros	0.72515	0.23700	3.060	0.00222
Radio entre 300 y 200 metros	-0.21330	0.31059	-0.687	0.49223
Grados de libertad				181
Desviación residual				235.76
AIC				521.54
2 x log-probabilidad				235.76
Chi ²				0.0003094632

En la modelación de heridos graves no se obtuvo variables significativas, por lo que el modelo se dejó con las variables básicas: una constante y TPDA. Esto pudo deberse a la muy baja ocurrencia de este tipo de choques y a que el tramo de autopista es pequeño en proporción a la longitud total de la carretera, por lo que los tramos homogéneos que se obtuvieron y que son la base estadística de análisis, fueron pocos.

Cuadro 10. Resultado de modelo Poisson, heridos graves

Variable	Estimado	Error estándar	z	Pr(> z)
Constante	-3.3771	4.6232	-0.730	0.465
log(TPDA)	-0.3322	0.4094	-0.811	0.417
Grados de libertad			188	
Desviación residual			142.52	
AIC			242.3	
2 x log-probabilidad			142.52	

Finalmente, de manera similar a la anterior, para los choques con víctimas mortales la única variable significativa fue el espaldón.

Cuadro 11. Resultado de modelo Poisson, víctimas mortales

Variable	Estimado	Error estándar	z	Pr(> z)
Constante	-4.1654	9.3892	-0.444	0.6573
log(TPDA)	-0.5139	0.8217	-0.625	0.5317
Espaldones de menos de 1,8 metros (Base)	-	-	-	-
Espaldón de 1,8 metros	2.3120	1.0272	2.251	0.0244
Grados de libertad			187	
Desviación residual			84.784	
AIC			134.62	
2 x log-probabilidad			84.784	
Chi ²			0.0006372712	

Carretera de 2 carriles

Para los choques totales, con solo daños materiales y heridos leves, se utilizó el ajuste de probabilidad Binomial Negativa y para los choques con heridos graves y víctimas mortales, se utilizó el ajuste de probabilidad de Poisson.

En el modelo de total de choques se obtuvo como variables significativas, la cantidad de carriles, la velocidad límite y la velocidad de diseño. Es decir, las variables del Cuadro 12 son las que tienen más influencia en la mayor o menor probabilidad de que se presenten choques. Por ejemplo, el coeficiente negativo en la variable de la velocidad de diseño de 100 km/h, indica que en esta condición es menos probable que ocurran accidentes, pero si el coeficiente fuera positivo, la probabilidad de mayor incidencia de choques sería mayor, en relación con esa variable.

Cuadro 12. Resultado de modelo Binomial Negativo, total de choques

Variable	Estimado	Error estándar	z	Pr(> z)
Constante	-6.66823	0.87291	-7.639	2.19e-14
log(TPDA)	0.07057	0.08545	0.826	0.408896
2 carriles (Base)	-	-	-	-
3 carriles	0.45708	0.11479	3.982	6.84e-05
4 carriles	0.33164	0.10657	3.112	0.001859
Velocidad límite 40 y 60 km/h (Base)	-	-	-	-
Velocidad límite 70 km/h	0.28472	0.13438	2.119	0.034108
Velocidad límite 80 km/h	0.31435	0.13493	2.330	0.019815
Velocidad de diseño de 80 km/h (Base)	-	-	-	-
Velocidad de diseño de 100 km/h	-0.37955	0.10309	-3.682	0.000232
Grados de libertad				713
Desviación residual				762.78
AIC				2051.7
2 x log-probabilidad				-2035.691
Chi ²				0.0001303123

Las variables del modelo de daños materiales son la cantidad de carriles y la velocidad de diseño, la cual, implica menor ocurrencia de choques en tramos de 100 km/h.

Cuadro 13. Resultado de modelo Binomial Negativo, daños materiales

Variable	Estimado	Error estándar	z	Pr(> z)
Constante	-7.71279	0.90881	-8.487	< 2e-16
log(TPDA)	0.14743	0.08864	1.663	0.096263
2 carriles (Base)	-	-	-	-
3 carriles	0.56520	0.12491	4.525	6.05e-06
4 carriles	0.47631	0.11358	4.194	2.75e-05
Velocidad de diseño de 80 km/h (Base)	-	-	-	-
Velocidad de diseño de 100 km/h	-0.42016	0.11575	-3.630	0.000283
Grados de libertad				715
Desviación residual				711.57
AIC				1783.5
2 x log-probabilidad				-1771.458
Chi ²				0.0001481753

Los choques con heridos leves se ven afectados principalmente por la cantidad de carriles, en especial, cuando hay carril de adelantamiento o ascenso en los tramos de 3 carriles.

Cuadro 14. Resultado de modelo Binomial Negativo, heridos leves

Variable	Estimado	Error estándar	z	Pr(> z)
Constante	-6.8672	1.7333	-3.962	7.43e-05
log(TPDA)	-0.1179	0.1735	-0.680	0.496743
2 carriles (Base)	-	-	-	-
3 carriles	0.8244	0.2133	3.866	0.000111
4 carriles	0.4949	0.2042	2.424	0.015345
Grados de libertad				716
Desviación residual				447.21
AIC				717.16
2 x log-probabilidad				-707.162
Chi ²				0.000261

Los modelos de choques con heridos graves y víctimas mortales, fueron elaborados con la función de probabilidad de Poisson, pues con el modelo Binomial Negativo no se logró ningún ajuste, sin embargo, a pesar que se lograron mejores indicadores, no se logró obtener un modelo válido con más que la constante y el TPDA.

Cuadro 15. Resultado de modelo Poisson, heridos graves

Variable	Estimado	Error estándar	z	Pr(> z)
Constante	-7.72303	2.54114	-3.039	0.00237
log(TPDA)	-0.07703	0.25320	-0.304	0.76095
Grados de libertad			718	
Desviación residual			308.80	
AIC			431.09	
2 x log-probabilidad			308.80	

Cuadro 16. Resultado de modelo Poisson, víctimas mortales

Variable	Estimado	Error estándar	z	Pr(> z)
Constante	-2.0103	6.1568	-0.327	0.744
log(TPDA)	-0.7785	0.6220	-1.252	0.211
Grados de libertad			718	
Desviación residual			130.50	
AIC			170.5	
2 x log-probabilidad			130.50	

5.2. Modelos Multivariados

Basado en las variables obtenidas como significativas en la modelación indicada en el punto 4.1, se hizo la modelación multivariada con el software WinBUGS14, generando modelos que permiten explicar la ocurrencia de todas las severidades de choques, debido a las variables que resulten significativas y a variables con las que estén interrelacionadas.

En un primer momento, se procede a iterar con las variables de la modelación Binomial Negativa o Poisson y se van eliminando, de acuerdo con los resultados que se obtengan hasta que resulte un modelo significativo. Para todas las variables se calcula el porcentaje de error dividiendo el “MC error” (precisión computacional de la media) entre el “Error estándar” (desviación estándar de las simulaciones, que es similar a la desviación estándar de la distribución); si dicho error resulta menor al 5% para cada variable, se toma como válido el modelo (Woodworth, 2019).

Posterior a la corrida de los Modelos Multivariados, se procedió igualmente a correr los modelos Univariados y Totales. En el Modelo Multivariado, el error consiste en una matriz de 4 columnas, una por cada severidad de choque y una cantidad de filas igual a la cantidad de tramos (unidad muestral), en el Univariado, dicho error es un vector igual a la cantidad de tramos. Además, se corrió el modelo Univariado para los choques totales, igualmente en todos los casos se hicieron modelos para carretera de 2 carriles y autopista por separado.

A continuación, se presentan los resultados para la sección de autopista y de carretera de dos carriles. De acuerdo con los cuadros 17 y 18 el resultado obtenido mediante los modelos multivariados presenta errores menores en algunas variables de los modelos Multivariados, respecto a los Univariados. Por otra parte, en ambos tipos de carretera, se observa que el DIC (*Deviance Information Criterion*) resultante es menor para el modelo Multivariado, lo cual implica que estos modelos presentan un mejor ajuste que los Univariados, ya que el modelo con el menor DIC es el que se estima predecirá y se ajustará mejor a la estructura de los datos observados (Universidad de Cambridge, 2019).

Además, se realizó la corrida del modelo para los choques totales para autopista y carretera de dos carriles, cuyos resultados se indican en los cuadros 19 y 20.

Cuadro 17. Resultados de modelo multivariado y univariado para el tramo de autopista

Variable	Multivariado					Univariado				
	Estimado	Error estándar	MC Error	P95	P5	Estimado	Error estándar	MC Error	P95	P5
Daños Materiales										
(Constante)	14,84	3,016	0,1418	9,591	19,4	15,71	2,84	0,1334	11,34	19,92
TPDA	-1,096	0,2775	0,01305	-1,519	-0,6235	-1,178	0,2586	0,01215	-1,559	-0,7801
6 o más carriles	1,13	0,5589	0,01643	0,218	2,062	1,158	0,578	0,0158	0,2129	2,113
Espaldón de 1,8 metros	-0,443	0,4027	0,0126	-1,109	0,2085	-0,4402	0,438	0,01399	-1,171	0,2681
Radio mayor a 1900 metros	0,2163	0,4303	0,01353	-0,4754	0,9396	0,236	0,4566	0,01443	-0,489	1,009
Radio entre 1200 y 1900 metros	0,3292	0,6332	0,01763	-0,6818	1,392	0,3708	0,6795	0,01883	-0,7431	1,498
Radio entre 360 y 510 metros	0,3346	0,4176	0,01229	-0,3479	1,023	0,3487	0,4616	0,01403	-0,3994	1,113
Radio menor a 300 metros	-0,3755	0,4517	0,0128	-1,117	0,3631	-0,3826	0,4843	0,01421	-1,182	0,4084
Velocidad límite 80 km/h	0,4916	0,4586	0,01528	-0,2462	1,266	0,526	0,4772	0,01524	-0,2393	1,336
Velocidad límite 90 km/h	0,8301	0,7686	0,02432	-0,4049	2,12	0,8578	0,7977	0,02384	-0,4146	2,198
Velocidad límite 100 km/h	-0,6895	0,4954	0,01424	-1,486	0,1414	-0,6559	0,5182	0,01426	-1,495	0,2081
Leves										
(Constante)	5,914	4,355	0,2027	-0,9418	13,24	1,079	3,047	0,1395	-4,027	6,037
TPDA	-0,4579	0,4029	0,01876	-1,13	0,1813	-0,009017	0,2773	0,0127	-0,4584	0,4602
6 o más carriles	0,5815	0,4565	0,008784	-0,1592	1,337	0,4114	0,4719	0,006438	-0,3688	1,172
Espaldón de 1,8 metros	-0,1267	0,3265	0,005606	-0,6646	0,4045	-0,2467	0,3408	0,004678	-0,8222	0,2925
Radio mayor a 1900 metros	0,2301	0,4013	0,009588	-0,4118	0,9014	0,06376	0,4011	0,006554	-0,568	0,743
Radio entre 1200 y 1900 metros	0,4907	0,4711	0,009222	-0,2541	1,29	0,3528	0,486	0,006052	-0,405	1,177
Radio entre 360 y 510 metros	0,7628	0,3454	0,006743	0,2028	1,337	0,6528	0,3628	0,00513	0,06489	1,251
Radio menor a 300 metros	-0,1155	0,399	0,005858	-0,7656	0,5436	-0,108	0,4254	0,005455	-0,7888	0,6018
Velocidad límite 80 km/h	0,2653	0,3854	0,007284	-0,3517	0,9089	0,2241	0,3976	0,005849	-0,4168	0,8867
Velocidad límite 90 km/h	-0,1853	0,6023	0,01101	-1,15	0,8307	-0,258	0,6208	0,007946	-1,267	0,7695
Velocidad límite 100 km/h	-0,6083	0,4132	0,006483	-1,278	0,07604	-0,7029	0,4246	0,004619	-1,397	-0,005729
Graves										
(Constante)	14,45	7,367	0,3402	2,569	26,1	5,812	6,598	0,3031	-4,756	16,51
TPDA	-1,432	0,6805	0,03144	-2,52	-0,3382	-0,592	0,601	0,02763	-1,559	0,3598
6 o más carriles	-0,01665	0,917	0,02073	-1,515	1,496	-0,4027	0,8205	0,01188	-1,748	0,9274
Espaldón de 1,8 metros	0,3033	0,6993	0,01469	-0,8084	1,488	0,07135	0,6113	0,007851	-0,8902	1,095
Radio mayor a 1900 metros	1,221	0,7231	0,0189	0,1119	2,478	0,6364	0,6071	0,01121	-0,2957	1,666
Radio entre 1200 y 1900 metros	1,367	0,8998	0,02308	0,001136	2,915	0,7871	0,7098	0,01056	-0,3633	1,912
Radio entre 360 y 510 metros	0,6094	0,7028	0,01553	-0,5112	1,783	0,3753	0,6094	0,008714	-0,6188	1,363
Radio menor a 300 metros	-0,8674	0,8877	0,01336	-2,379	0,5246	-0,8936	0,8336	0,006999	-2,316	0,4053
Velocidad límite 80 km/h	0,72	0,8251	0,01853	-0,5783	2,107	0,3623	0,7176	0,009641	-0,775	1,569
Velocidad límite 90 km/h	-1,039	1,368	0,02693	-3,299	1,165	-1,29	1,218	0,012	-3,314	0,6461
Velocidad límite 100 km/h	0,1008	0,8154	0,01615	-1,203	1,465	-0,1159	0,7289	0,007574	-1,305	1,072
Fatales										
(Constante)	6,61	11,21	0,5179	-13,18	25,28	5,718	11,2	0,5172	-12,5	24,38
TPDA	-0,9006	1,022	0,04721	-2,634	0,8598	-0,808	1,015	0,04688	-2,531	0,8283
6 o más carriles	-25	19,16	0,04848	-61,86	-1,538	-25,14	19,23	0,0462	-62,26	-1,642
Espaldón de 1,8 metros	2,381	2,042	0,05681	-0,5375	6,043	2,061	1,998	0,05456	-0,6723	5,716
Radio mayor a 1900 metros	0,4392	0,7981	0,01912	-0,8151	1,776	0,2654	0,7231	0,01311	-0,8876	1,45
Radio entre 1200 y 1900 metros	-0,7431	0,9912	0,02155	-2,37	0,8639	-0,8003	0,9633	0,01911	-2,389	0,7261
Radio entre 360 y 510 metros	-0,8451	0,8979	0,01687	-2,352	0,5936	-0,9424	0,9353	0,01572	-2,503	0,5065
Radio menor a 300 metros	-2,12	1,642	0,02426	-5,084	0,2076	-1,992	1,68	0,02711	-5,067	0,3216
Velocidad límite 80 km/h	0,4295	2,024	0,05103	-2,848	3,813	0,6	2,077	0,05421	-2,853	3,957
Velocidad límite 90 km/h	1,895	2,26	0,0565	-1,714	5,717	2,103	2,302	0,05789	-1,663	5,846
Velocidad límite 100 km/h	-0,3536	2,166	0,05326	-3,914	3,229	-0,04434	2,19	0,05529	-3,729	3,467
Estadísticas Resumidas										
	\bar{D}	DIC		p_D		\bar{D}	DIC		p_D	
	1758,44	1836,91		78,477		1760,17	1842,58		82,41	

Cuadro 18. Resultados de modelo multivariado y univariado para el tramo de carretera de 2 carriles

Variable	Multivariado					Univariado				
	Estimado	Error estándar	MC Error	P95	P5	Estimado	Error estándar	MC Error	P95	P5
Daños Materiales										
(Constante)	-0,9236	1,017	0,04759	-2,589	0,7117	-0,9892	1,104	0,0484	-2,768	0,9151
TPDA	0,151	0,09936	0,004652	-0,008765	0,3139	0,1569	0,1081	0,004739	-0,03034	0,3305
Carril de adelantamiento (3 carriles)	0,5571	0,1478	0,00184	0,3149	0,8008	0,5679	0,1476	1,37E-03	0,3251	0,8101
Más de 3 carriles	0,4939	0,1395	0,001798	0,2643	0,7234	0,5028	0,1401	0,001362	0,2755	0,7353
Velocidad de diseño de 100 km/h	-0,4214	0,1351	0,002117	-0,6445	-0,2	-0,4223	0,1351	0,00183	-0,6448	-0,2006
Leves										
(Constante)	0,9028	2,129	0,09868	-2,739	4,332	0,9677	1,857	0,07614	-2,002	3,979
TPDA	-0,1947	0,2102	0,009742	-0,5347	0,1633	-0,1982	0,1831	0,007507	-0,4958	0,0935
Carril de adelantamiento (3 carriles)	0,6739	0,2473	0,0025	0,2664	1,078	0,669	0,2421	0,002081	0,2703	1,066
Más de 3 carriles	0,4367	0,23	0,002175	0,05898	0,815	0,4072	0,2235	0,001404	0,04011	0,7748
Velocidad de diseño de 100 km/h	-0,3189	0,2278	0,003125	-0,6941	0,05351	-0,3264	0,2204	0,002429	-0,6914	0,03506
Graves										
(Constante)	0,007754	3,153	0,1459	-5,142	5,306	0,1649	3,031	0,1278	-4,616	5,119
TPDA	-0,1574	0,3109	0,01439	-0,6822	0,3439	-0,1778	0,2994	0,01263	-0,6731	0,2903
Carril de adelantamiento (3 carriles)	-0,5828	0,4548	0,003895	-1,354	0,1378	-0,588	0,4714	0,003147	-1,388	0,1601
Más de 3 carriles	-0,1152	0,3504	0,003933	-0,6926	0,4572	-0,1514	0,3675	0,002929	-0,7537	0,4521
Velocidad de diseño de 100 km/h	-0,291	0,329	0,004527	-0,8338	0,245	-0,2911	0,3438	0,00421	-0,8566	0,269
Fatales										
(Constante)	3,659	6,45	0,301	-6,606	14,97	4,164	6,217	0,265	-5,628	14,63
TPDA	-0,6629	0,6462	0,03016	-1,801	0,3595	-0,7139	0,6225	0,02654	-1,772	0,2591
Carril de adelantamiento (3 carriles)	0,05584	0,6802	0,005689	-1,094	1,13	0,05687	0,6806	0,004681	-1,094	1,136
Más de 3 carriles	-0,7516	0,7344	0,004382	-2,023	0,3771	-0,7416	0,7329	0,003376	-2,015	0,3805
Velocidad de diseño de 100 km/h	0,07893	0,5522	0,005834	-0,8271	0,9885	0,07901	0,554	0,004998	-0,8314	0,9901
Estadísticas Resumidas										
	\bar{b}	DIC		p_b		\bar{b}	DIC		p_b	
	2980,57	3077,21		96,641		2980,87	3084,56		103,695	

Cuadro 19. Resultados de modelo de total de choques para el tramo de autopista

Variable	Estimado	Error estándar	MC Error	P95	P5
(Constante)	13,64	2,635	0,1238	9,693	17,95
TPDA	-0,9662	0,2388	0,01122	-1,356	-0,6082
6 o más carriles	0,9659	0,4708	0,01249	0,2049	1,744
Espaldón de 1,8 metros	-0,5851	0,3252	0,009108	-1,11	-0,0441
Velocidad límite de 80 km/h	0,7645	0,3374	0,009614	0,2078	1,311
Velocidad límite de 90 km/h	1,19	0,5038	0,01258	0,3723	2,026
Velocidad límite de 100 km/h	-0,3671	0,4182	0,01037	-1,049	0,3288
Estadísticas Resumidas	\bar{D}	DIC		p_D	
	963,797	999,511		35,714	

Cuadro 20. Resultados de modelo de total de choques para el tramo de 2 carriles

Variable	Estimado	Error estándar	MC Error	P95	P5
(Constante)	0,4755	1,059	0,04643	-1,273	2,236
TPDA	0,07201	0,1004	0,004405	-0,09435	0,238
Carril de adelantamiento (3 carriles)	0,4571	0,1343	0,001133	0,237	0,6776
Más de 3 carriles	0,348	0,1288	0,001323	0,1386	0,5612
Velocidad límite 70 km/h	-0,0633	0,2128	0,003218	-0,4154	0,2843
Velocidad límite 80 km/h	-0,3178	0,1594	0,002604	-0,5791	-0,057
Velocidad de diseño de 100 km/h	-0,3838	0,12	0,001796	-0,5813	-0,1865
Estadísticas Resumidas	\bar{D}	DIC		p_D	
	1990,66	2054,22		63,562	

Como se puede ver, en el caso de la autopista, las variables representativas para todas las severidades son la existencia de 6 o más carriles, espaldones de 1,8 metros, los radios de las curvas horizontales y las velocidades límite de 80 km/h o más. Para el modelo del total de choques, las variables significativas serán las mismas, excepto los radios. Estos resultados evidencian que hay mayor ocurrencia de choques en los tramos que poseen peajes y en los intercambios, en los tramos con velocidades altas, excepto en el caso de la velocidad límite de 100 km/h con la cual se dan mayor cantidad de choques graves, pero no del resto de las severidades, es decir, que en este caso se tiende a tener cantidades muy bajas de choques, pero los que ocurren son muy severos.

Para la carretera de dos carriles se puede observar que las variables significativas son la existencia de 3 o más carriles y la velocidad de diseño de 100 km/h. Los choques fatales se dan en tramos con

velocidad de diseño de 100 km/h (fuera de la zona montañosa), mientras que los choques con solo daños materiales o leves, se dan en zonas de peajes o intercambios (más de 3 carriles) y todos excepto los graves, se producen más en tramos con carriles de adelantamiento. En el modelo de choques totales se tienen las mismas variables que para fatales, más la velocidad límite de 70 y 80 km/h, de forma que se espera que haya más choques en tramos de velocidades límite más bajas y con 3 o más carriles.

6. Tramos con exceso de choques

6.1. Identificación de tramos con exceso de choques

A partir de los resultados obtenidos con el WinBugs, se generó los datos para cada uno de los tramos de autopista y de carretera de 2 carriles calculando la media y la probabilidad de la ocurrencia de choques equivalentes a choques con solo daños materiales, para lo cual, se incluyó los datos del Cuadro 21 al hacer el modelado.

Cuadro 21. Choques equivalentes

Tipo de choque	Equivalencia a choques con daños materiales
Muertos	40
Heridos graves	12
Heridos leves	3
Daños materiales	1

Fuente: (Castro, 2013)

En el Cuadro 22 se presentan únicamente los tramos que poseen los valores de confiabilidad positivos para al menos un 5% (P95), lo cual implica que tienen exceso de choques, respecto de tramos con características similares. Esto indica que, por ejemplo, para el percentil 95 de las iteraciones (P95), existe un 5% de probabilidad de que se sobrepase el total de choques en esos tramos respecto a tramos similares.

Cuadro 22. Tramos con exceso de choques

	ID Tramo	Media	Error estándar	MC error	P97,5	P95	P50	P5	P2,5
Autopista	42	10,65	7,209	0,1439	-0,8699	1,008	9,738	23,59	27,56
	81	11,08	4,153	0,08324	3,607	4,842	10,83	18,18	20,08
	177	7,789	3,121	0,04992	2,672	3,508	7,48	13,17	14,84
	179	20,05	7,138	0,1799	5,598	8,361	20,11	31,57	34,03
2 carriles	20	3,202	2,695	0,04855	-0,3497	0,0009979	2,633	8,335	9,991
	22	2,066	1,395	0,01889	-0,01414	0,2388	1,855	4,604	5,379
	37	4,979	3,809	0,07577	-0,507	0,1252	4,309	12,14	14,3
	64	1,707	1,314	0,02484	0,1064	0,2522	1,414	4,15	5,043
	104	6,049	2,864	0,0382	1,462	2,058	5,693	11,24	12,72
	145	2,194	2,105	0,04732	-0,1791	0,004156	1,65	6,239	7,666

6.2. Caracterización de los tramos y propuesta de soluciones

A continuación, se incluyen en orden de ubicación (sentido San José – Caldera), las fichas de cada uno de los tramos identificados, en las cuales se incluye las principales características de cada tramo, de los choques que se dieron durante el periodo de análisis, lo observado en la gira de campo y las recomendaciones que se dan para cada caso. En el Mapa 16 se muestra la ubicación de todos los tramos.

ID Tramo	179
-----------------	------------

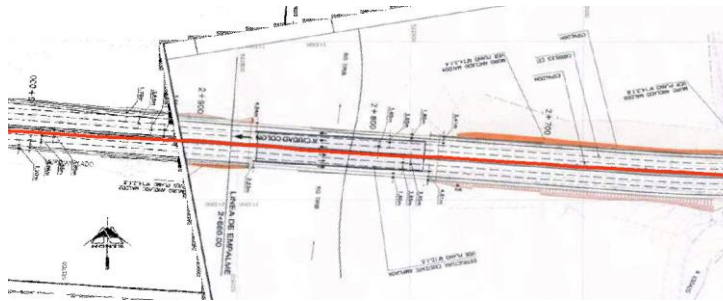
Ubicación Inicio: 2+580
Fotografía aérea Fin: 3+020



Características tramo

Longitud (m)	422,68
Ancho espaldón (m)	1,6
Ancho mediana (m)	0,6
Radio (m)	502,77
Pendiente entrada (%)	-6
Pendiente salida (%)	0,12

Plano



Tipo choque	Total
Atropello	
Atropello ciclista	1
Caida material	
Choque con animal	
Choque frontal	
Choque lateral	4
Choque motocicleta	1
Choque multiple	14
Choque objeto fijo	8
Choque posterior	73
Derrape	3
Falla mecanica	
Otro	10
Salida de via	1
Vuelco	3

Rango horas	Total choques
6:00 am - 9:00 am	24
9:00 am - 4:00 pm	30
4:00 pm - 7:00 pm	26
7:00 pm - 6:00 am	36
Sin dato	2

Gravedad	Total
Daños materiales	101
Heridos leves	13
Heridos graves	4
Víctimas mortales	0

Características observadas en campo:

En este tramo se presenta congestión, además al ser un tramo muy recto y con pendiente fuerte. El día de la gira se observó un choque múltiple por detrás, de 3 vehículos, en sentido San José - Caldera, después del puente, en el carril junto a la medianera tipo New Jersey. Se observa que los espaldones efectivos son más angostos.

Recomendaciones:

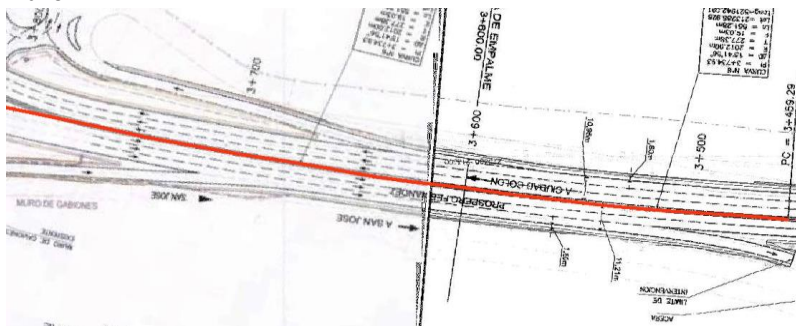
Al ser un tramo de alto tránsito y muy congestionado, es recomendable mejorar la visibilidad, despejando los costados, se pueden colocar también franjas sonoras horizontales, además, se deben colocar señales preventivas de cambio de velocidad y demarcación que prevenga de guardar la distancia. En la ampliación de la carretera, es recomendable prever una medianera más ancha y espaldones más amplios, de ser posible, disminuir la pendiente, pues la mayoría de los choques son posteriores y múltiples.

ID Tramo	81
----------	----

Ubicación Inicio: 3+460
Fotografía aérea Fin: 3+800



Plano



Rango horas	Total choques
6:00 am - 9:00 am	10
9:00 am - 4:00 pm	21
4:00 pm - 7:00 pm	16
7:00 pm - 6:00 am	10
Sin dato	1

Gravedad	Total
Daños materiales	14
Heridos leves	1
Heridos graves	0
Víctimas mortales	0

Características tramo

Longitud (m)	342,43
Ancho espaldón (m)	1,6
Ancho mediana (m)	0,6
Radio (m)	2012
Pendiente entrada (%)	-2,1
Pendiente salida (%)	-5,7

Tipo choque	Total
Atropello	
Atropello ciclista	
Caida material	
Choque con animal	
Choque frontal	1
Choque lateral	11
Choque motocicleta	1
Choque multiple	3
Choque objeto fijo	9
Choque posterior	23
Derrape	1
Falla mecanica	
Otro	9
Salida de via	
Vuelco	

Características observadas en campo:

La pendiente es bastante pronunciada, es un tramo muy transitado y tiende a congestionarse, se observan maniobras de cambio de carril y hay salidas hacia rampas. Especialmente, en sentido San José - Caldera, se observa poca visibilidad hacia adelante por la curva vertical en cresta. Es un tramo recto que se presta para ir a velocidad alta.

Recomendaciones:

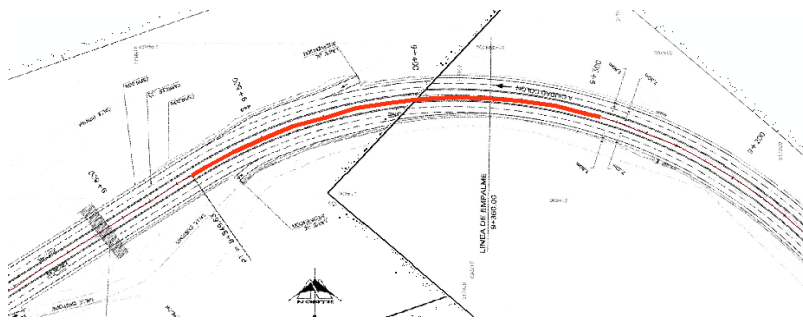
La rampa de salida sentido San José - Caldera, tiene una transición de aproximadamente 50 m sin carril de desaceleración (observado de planos y fotografía aérea), se recomienda para una velocidad de diseño de 100 km/h y sin corrección por pendiente, al menos 145 m de longitud de desaceleración (incluye transición y carril de desaceleración). Se debe colocar con anterioridad, señalización más clara que indique con suficiente antelación, la presencia de la salida, para disminuir los cambios de carril abruptos. En sentido Caldera - San José, el carril de aceleración de la rampa de entrada coincide con el carril de desaceleración de la rampa de salida, sin que la longitud sea suficiente para ninguna de las dos maniobras, se recomienda señalización vertical más clara y franjas reductoras de velocidad para facilitar la salida de los vehículos a la carretera.

ID Tramo	177
-----------------	------------

Ubicación Inicio: 9+280
 Fotografía aérea Fin: 9+540



Plano



Características tramo

Longitud (m)	260,99
Ancho espaldón (m)	1,8
Ancho mediana (m)	7
Radio (m)	300
Pendiente entrada (%)	-7,4
Pendiente salida (%)	-7,1

Tipo choque	Total
Atropello	
Atropello ciclista	
Caida material	
Choque con animal	
Choque frontal	
Choque lateral	2
Choque motocicleta	
Choque multiple	8
Choque objeto fijo	1
Choque posterior	21
Derrape	4
Falla mecanica	
Otro	3
Salida de via	2
Vuelco	3

Rango horas	Total choques
6:00 am - 9:00 am	5
9:00 am - 4:00 pm	13
4:00 pm - 7:00 pm	13
7:00 pm - 6:00 am	9
Sin dato	4

Gravedad	Total
Daños materiales	12
Heridos leves	2
Heridos graves	1
Víctimas mortales	0

Características observadas en campo:

La curva se percibe muy cerrada, coincidente con el radio pequeño que posee. Hay rampa de salida del condominio Villa Real, además de una mala visibilidad.

Este tramo tiene problemas por tener pendientes muy altas, ya que los vehículos pesados pierden velocidad y se dan situaciones en que dos vehículos pesados suben la cresta por ambos carriles, bloqueando el paso a los livianos.

Recomendaciones:

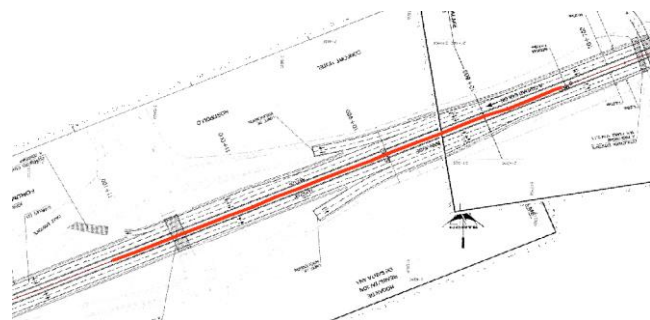
Midiendo del plano, la longitud del carril más la transición de aceleración, tiene unos 70 metros, los cuales además están en la curva. Debe ampliarse este carril a unos 285 m mínimo, incluida la transición, con lo cual además quedaría en la recta y con mejor visibilidad. Colocar bandas sonoras en la curva, para disminuir la velocidad y por lo tanto, la ocurrencia de choques posteriores.

ID Tramo	42
-----------------	-----------

Ubicación Inicio: 10+740
Fotografía aérea Fin: 11+120



Plano



Rango horas	Total choques
6:00 am - 9:00 am	13
9:00 am - 4:00 pm	22
4:00 pm - 7:00 pm	10
7:00 pm - 6:00 am	12
Sin dato	3

Gravedad	Total
Daños materiales	17
Heridos leves	2
Heridos graves	1
Víctimas mortales	1

Características tramo

Longitud (m)	384,24
Ancho espaldón (m)	1,8
Ancho mediana (m)	7
Radio (m)	tangente
Pendiente entrada (%)	-1,1
Pendiente salida (%)	1,6

Tipo choque	Total
Atropello	7
Atropello ciclista	
Caida material	
Choque con animal	
Choque frontal	1
Choque lateral	2
Choque motocicleta	
Choque multiple	7
Choque objeto fijo	3
Choque posterior	28
Derrape	1
Falla mecanica	
Otro	7
Salida de via	3
Vuelco	1

Características observadas en campo:

Tramo muy recto que se presta para alta velocidad, con un intercambio con varias rampas de entrada y salida de la carretera. Justo antes de la rampa de salida en sentido San José - Caldera, se observa, por ejemplo, una bahía de bus (esto se repite en varios intercambios) no se tiene suficiente longitud para que los vehículos cambien de carril a la rampa. Las pendientes de las rampas son pronunciadas. En el sentido Caldera - San José, se observó también congestión en la rampa de salida.

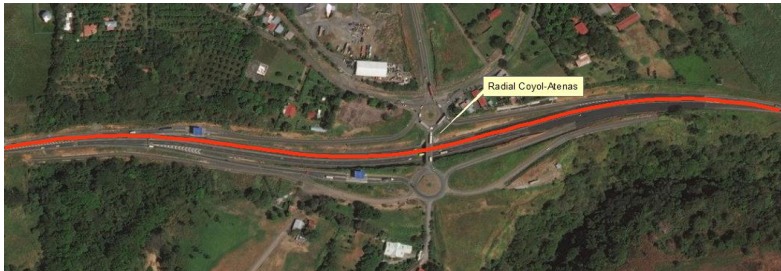
Recomendaciones:

La longitud de carriles de aceleración y desaceleración de las rampas de entrada y salida, no es suficiente, por lo que debe ampliarse en todos los casos.

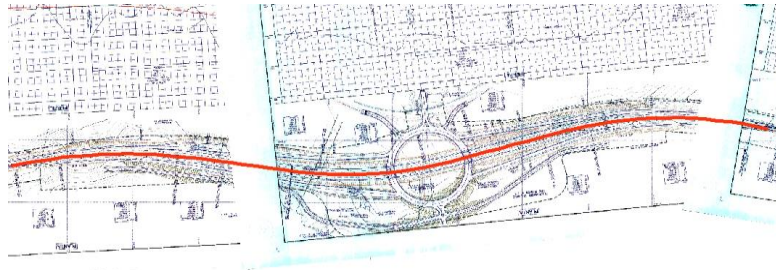
En este tramo hay muchos atropellos registrados, en la gira de campo se verificó que existe un puente peatonal, que no existía en planos, por lo que se supone debió ser construido probablemente por esta causa.

ID Tramo	37
-----------------	-----------

Ubicación Inicio: 21+920
 Fotografía aérea Fin: 23+100



Plano



Rango horas	Total choques
6:00 am - 9:00 am	4
9:00 am - 4:00 pm	12
4:00 pm - 7:00 pm	6
7:00 pm - 6:00 am	3
Sin dato	

Gravedad	Total
Daños materiales	17
Heridos leves	3
Heridos graves	4
Víctimas mortales	1

Características tramo

Longitud (m)	1179,85
Ancho espaldón (m)	1,8
Ancho mediana (m)	0
Radio (m)	600
Pendiente entrada (%)	0
Pendiente salida (%)	0,6

Tipo choque	Total
Atropello	
Atropello ciclista	
Caida material	1
Choque con animal	
Choque frontal	
Choque lateral	3
Choque motocicleta	
Choque multiple	1
Choque objeto fijo	3
Choque posterior	5
Derrape	2
Falla mecanica	
Otro	3
Salida de via	5
Vuelco	2

Características observadas en campo:

El intercambio es distinto al facilitado en planos, según se observa en la fotografía aérea. Se observó que el tramo no posee barrera hasta que se ingresa propiamente al intercambio y se amplía la sección transversal, además estas poseen terminación inclinada. Hay postes y los bastiones del paso a desnivel, muy cerca de la calzada, así como señales. Hay rampas de acceso y salida las cuales además tienen casetas de peaje.

Recomendaciones:

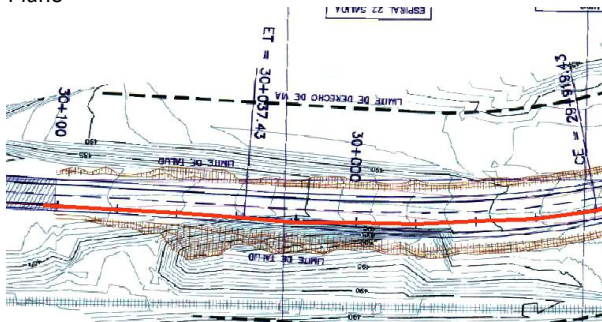
Colocar amortiguador en el inicio de la barrera. Desplazar objetos fijos, eliminarlos o demarcarlos, de acuerdo con la disponibilidad de espacio del derecho de vía. Demarcar los bastiones del paso a desnivel. Aumentar la longitud de transición de las rampas de acceso y salida.

ID Tramo	64
----------	----

Ubicación Inicio: 29+920
Fotografía aérea Fin: 30+100



Plano



Rango horas	Total choques
6:00 am - 9:00 am	1
9:00 am - 4:00 pm	5
4:00 pm - 7:00 pm	3
7:00 pm - 6:00 am	3
Sin dato	

Gravedad	Total
Daños materiales	9
Heridos leves	1
Heridos graves	2
Víctimas mortales	0

Características tramo

Longitud (m)	186,86
Ancho espaldón (m)	1,8
Ancho mediana (m)	0
Radio (m)	230
Pendiente entrada (%)	-6
Pendiente salida (%)	0

Tipo choque	Total
Atropello	
Atropello ciclista	
Caida material	1
Choque con animal	
Choque frontal	2
Choque lateral	
Choque motocicleta	
Choque multiple	
Choque objeto fijo	
Choque posterior	2
Derrape	
Falla mecanica	
Otro	2
Salida de vía	2
Vuelco	3

Características observadas en campo:

Debido a la curva horizontal y los taludes, se observa en el sentido San José - Caldera, muy mala visibilidad. En el sentido Caldera - San José existe un carril de adelantamiento.

Recomendaciones:

Como parte de la ampliación de la carretera, deberá incluirse la adquisición suficiente de terrenos que permita que tener un derecho de vía mucho más amplio, para mejorar la visibilidad. Debe ampliarse el radio de la curva, ya que el mínimo para esta curva con peralte de 8% es de 229 m y el peralte es bastante alto por lo que puede estar afectando la incidencia de vuelcos.

ID Tramo	104
-----------------	------------

Ubicación
Fotografía aérea



Inicio: 30+800
Fin: 31+860

Características tramo

Longitud (m)	1060,08
Ancho espaldón (m)	1,8
Ancho mediana (m)	2,8
Radio (m)	1300
Pendiente entrada (%)	6
Pendiente salida (%)	-2,8

Plano



Tipo choque	Total
Atropello	1
Atropello ciclista	
Caida material	
Choque con animal	1
Choque frontal	
Choque lateral	
Choque motocicleta	1
Choque multiple	
Choque objeto fijo	6
Choque posterior	9
Derrape	9
Falla mecanica	
Otro	7
Salida de via	3
Vuelco	5

Rango horas	Total choques
6:00 am - 9:00 am	5
9:00 am - 4:00 pm	20
4:00 pm - 7:00 pm	8
7:00 pm - 6:00 am	7
Sin dato	2

Gravedad	Total
Daños materiales	36
Heridos leves	5
Heridos graves	1
Víctimas mortales	0

Características observadas en campo:

Justo saliendo de la curva horizontal en sentido San José - Caldera, empieza el acceso de salida del intercambio, también al inicio de la curva, se tiene el incremento de 2 a 4 carriles junto con el inicio de la medianera de barrera rígida con inicio tipo rampa. También se observan varios obstáculos, como postes, los bastiones del paso a desnivel y señales verticales, además de que existen las salidas y entradas a la carretera. Hay bandas sonoras en la calzada, antes de llegar al puente peatonal en el sentido Caldera - San José.

Recomendaciones:

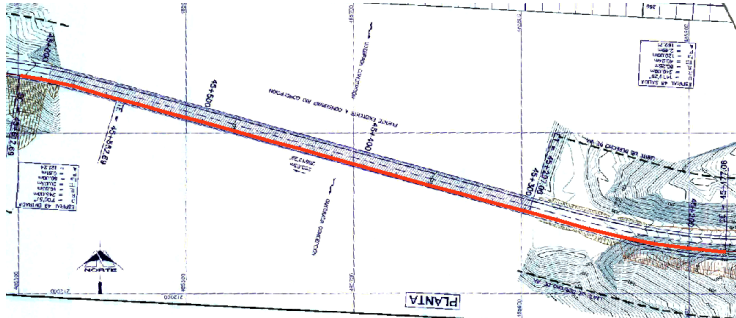
Colocar atenuador de impacto en el inicio de la barrera. Señalizar con mayor claridad y anterioridad el inicio de la salida del intercambio en sentido San José - Caldera, en la ampliación de la carretera debe contemplarse iniciar dicha salida en la tangente y mejorar el radio de la curva. Debe prestarse atención a mejorar la transición de convergencia de la rampa actual hacia la curva. Remover, desplazar o demarcar los obstáculos fijos, de acuerdo con las posibilidades del derecho de vía.

ID Tramo	22
-----------------	-----------

Ubicación Inicio: 45+180
Fotografía aérea Fin: 45+620



Plano



Rango horas	Total choques
6:00 am - 9:00 am	3
9:00 am - 4:00 pm	7
4:00 pm - 7:00 pm	3
7:00 pm - 6:00 am	6
Sin dato	

Gravedad	Total
Daños materiales	16
Heridos leves	3
Heridos graves	0
Víctimas mortales	0

Características tramo

Longitud (m)	435,62
Ancho espaldón (m)	1,8
Ancho mediana (m)	0
Radio (m)	240
Pendiente entrada (%)	-6
Pendiente salida (%)	-4

Tipo choque	Total
Atropello	
Atropello ciclista	
Caida material	
Choque con animal	
Choque frontal	3
Choque lateral	
Choque motocicleta	
Choque multiple	
Choque objeto fijo	1
Choque posterior	9
Derrape	1
Falla mecanica	
Otro	1
Salida de via	3
Vuelco	1

Características observadas en campo:

Hay curvas antes y después del puente y poca visibilidad por lo mismo. No hay transición entre las barreras flexibles y el puente. Hay taludes con pendiente pronunciada. En el sentido Caldera - San José hay carril de adelantamiento al inicio de la curva que inicia después de salir del puente. Es zona de deslizamientos.

Recomendaciones:

Para las obras de ampliación, debe incluirse la adquisición de terrenos suficiente para un derecho de vía y las correspondientes obras geotécnicas, para aumentar la visibilidad. Colocar señalización que alerte el inicio del carril de ascenso.

ID Tramo	20
-----------------	-----------

Ubicación
Fotografía aérea



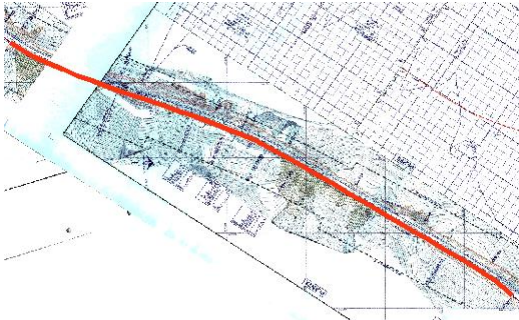
Inicio: 45+860

Fin: 46+580

Características tramo

Longitud (m)	723,63
Ancho espaldón (m)	1,8
Ancho mediana (m)	0
Radio (m)	500
Pendiente entrada (%)	5,5
Pendiente salida (%)	-0,5

Plano



Tipo choque	Total
Atropello	
Atropello ciclista	
Caida material	5
Choque con animal	
Choque frontal	2
Choque lateral	2
Choque motocicleta	
Choque multiple	
Choque objeto fijo	1
Choque posterior	3
Derrape	
Falla mecanica	
Otro	
Salida de via	1
Vuelco	1

Rango horas	Total choques
6:00 am - 9:00 am	3
9:00 am - 4:00 pm	4
4:00 pm - 7:00 pm	5
7:00 pm - 6:00 am	2
Sin dato	1

Gravedad	Total
Daños materiales	10
Heridos leves	1
Heridos graves	4
Víctimas mortales	0

Características observadas en campo:

Es zona de deslizamientos, con taludes pronunciados, hay barreras rígidas colocadas a los costados en el pie de los taludes (no instaladas), en el espaldón. También hay barrera flexible pero no posee transición con la barrera rígida. Hay señalización temporal y cuadrillas de trabajo en los taludes. Debido a la combinación de curvas verticales y horizontales hay poca distancia de visibilidad.

Recomendaciones:

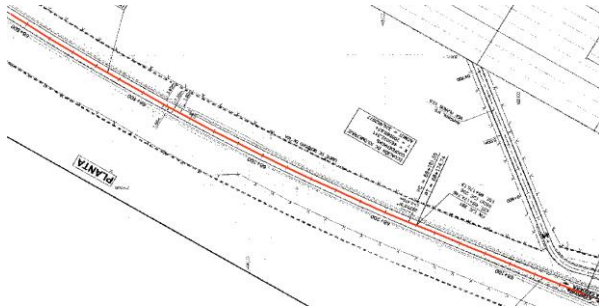
Para la ampliación, se recomienda la adquisición de suficiente ancho de derecho de vía para mejorar la distancia de visibilidad y las correspondientes obras geotécnicas para evitar la caída de material, mejorar la combinación entre el alineamiento vertical y horizontal, para garantizar la distancia de visibilidad de parada.

ID Tramo	145
-----------------	------------

Ubicación Inicio: 67+980
 Fotografía aérea Fin: 68+460



Plano



Rango horas	Total choques
6:00 am - 9:00 am	0
9:00 am - 4:00 pm	3
4:00 pm - 7:00 pm	5
7:00 pm - 6:00 am	1
Sin dato	1

Gravedad	Total
Daños materiales	5
Heridos leves	1
Heridos graves	3
Víctimas mortales	1

Características tramo

Longitud (m)	474,44349
Ancho espaldón (m)	1,8
Ancho mediana (m)	0
Radio (m)	1997,5
Pendiente entrada (%)	-6,20%
Pendiente salida (%)	2,50%

Tipo choque	Total
Atropello	1
Atropello ciclista	
Caida material	
Choque con animal	1
Choque frontal	1
Choque lateral	1
Choque motocicleta	
Choque multiple	
Choque objeto fijo	1
Choque posterior	2
Derrape	
Falla mecanica	
Otro	2
Salida de via	
Vuelco	1

Características observadas en campo:

En sentido hacia Caldera inicia al finalizar la transición de 4 a 2 carriles del intercambio de Cascajal de Orotina y con una pendiente descendente muy fuerte, siendo además un tramo donde se puede ingresar a una velocidad muy alta.

Recomendaciones:

Colocar bandas sonoras para disminuir la velocidad. Lo ideal, es que al realizar la ampliación de la carretera, se mantenga la mayor uniformidad posible en la cantidad de carriles, pues se observa que al haber disminución en la cantidad de carriles, los vehículos tienden a acelerar para adelantar rápido a otros vehículos antes de ingresar al tramo de dos carriles.

7. Conclusiones

A partir del procedimiento llevado a cabo y la obtención de resultados de esta investigación se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Se identificó la problemática de seguridad vial en los tramos con mayor probabilidad de sobrepasar el promedio de choques en la ruta nacional 27, aplicando los modelos multivariados, identificando las variables asociadas a la ocurrencia de los choques totales y por severidad: choques con solo daños materiales, con heridos leves, heridos graves y fatales (con víctimas mortales).
- A partir de la caracterización hecha de la ruta con los datos recopilados, esta posee las siguientes características geométricas: hay dos grandes secciones, una con características de autopista, con múltiples carriles e intercambios; la otra sección consiste en una carretera de dos carriles con tramos que poseen un carril adicional para adelantamiento o ascenso, pero con intercambios con 4 carriles; el ancho de carriles y espaldón es similar en toda la carretera, excepto en las zonas de peajes y puentes. En cuanto al TPDA, se debió completar datos faltantes en las estaciones, tomando como base las estaciones que poseían los datos más completos, para estimar la tasa de crecimiento anual; existen marcadas diferencias entre el TPDA de las estaciones del tramo de autopista y de la vía de 2 carriles, siendo este segundo de menos de la mitad de los volúmenes de las estaciones de la autopista. Con la información de choques, se pudo determinar la severidad, tipo y otras características de los mismos; por ejemplo, se tiene que el tipo de choques que poseen mayor severidad, con más choques mortales, son los atropellos a peatones, ciclistas y los choques frontales; la severidad de los atropellos muestra la vulnerabilidad de estos usuarios y la de los choques frontales, por la velocidad en que ambos vehículos recorren y la poca posibilidad de reacción de parte de los choferes.
- Se generaron las funciones de desempeño, tomando en cuenta cada gravedad y los choques totales, con las características de la carretera, teniendo que dividirla en dos tramos de tipología diferente: carretera de dos carriles y autopista, lo cual permitió obtener resultados más precisos en la modelación. Esto debió realizarse ya que los indicadores y errores que se obtuvieron, mostraron que estos modelos para toda la carretera no lograban ajustarse bien. Los datos de autopista se ajustaron mejor a una distribución de Poisson, mientras que los de carretera de dos carriles, a la Binomial Negativa, excepto por los choques menos frecuentes con heridos graves y víctimas mortales.
- Para el caso de la autopista, la función de desempeño de choques totales, depende del TPDA, la cantidad de carriles, el ancho de espaldón de 1,8 m y la velocidad límite; para daños materiales, además depende del radio; para heridos leves, del TPDA, de la velocidad límite y el radio; para heridos graves, únicamente del TPDA; para choques con víctimas mortales, del TPDA y el ancho de espaldón.

- Para el caso de la carretera de dos carriles, la función de desempeño de choques totales, depende del TPDA, el número de carriles, la velocidad límite y la velocidad de diseño; para daños materiales la diferencia respecto al de choques totales, es que no depende de la velocidad límite; para heridos leves, solo depende del TPDA y la cantidad de carriles; para heridos graves y choques con víctimas mortales, solamente del TPDA.
- Con las funciones de desempeño se tiene el punto de partida para la modelación por medio de Bayes completo, siendo estas una aproximación previa de las probabilidades de ocurrencia de choques.
- A partir de las funciones de desempeño obtenidas y utilizando Bayes Completo, se realizó la modelación multivariada, por medio de varias iteraciones, hasta garantizar errores menores al 5% en las estimaciones de las variables. Con esto se identificó cuáles son las variables que más afectan la ocurrencia de choques viales, según su severidad. Por ejemplo, en la sección de carretera de dos carriles se identificó que hay mayor tendencia a que se den choques en las zonas con carriles de adelantamiento, mientras que, en el caso del tramo de autopista, cuando hay 6 o más carriles y con velocidades límite de 80 y 90 km/h.
- Se logró identificar los tramos de concentración de choques, los cuales fueron analizados tanto desde los planos, como por medio de una visita de campo donde se pudieron verificar las características geométricas, de dispositivos de seguridad, señalización y visibilidad que provocaban problemas, así como el comportamiento de los usuarios en estos tramos. De esta forma se pudo observar en muchos tramos, deficiencias en cuanto a la distancia de visibilidad, cambios bruscos en las características geométricas, como en el caso de las aproximaciones a los intercambios y peajes, donde hay cambios fuertes en la cantidad de carriles. También se observó que los sitios con cambio en la cantidad de carriles, generan conflicto en los usuarios, especialmente cuando viajan a alta velocidad.
- Con la modelación realizada, se obtuvo muy buenos resultados, lo cual permite concluir que el uso de modelación multivariada y Bayes completo, son muy útiles para el análisis de choques en nuestro país. Además, la identificación de tramos de concentración de choques es bastante sencilla, de manera que, al realizar la corrida del modelo se obtienen los datos que permiten identificar dichos tramos, observando los resultados de los percentiles, por lo cual se pudo realizar el análisis de problemáticas y la propuesta de soluciones para cada tramo de forma individual y de igual manera, observar similitudes entre las condiciones de los tramos.
- Se observó que los tramos identificados con exceso de choques, contienen características en común, al mismo tiempo que las medidas por aplicar se enfocarían, en gran parte, en problemas similares para varios de los tramos analizados. Se destaca el tipo de choque que se da con mayor frecuencia, es por alcance, lo cual es un indicador del tipo de medidas de mejora que deben priorizarse.
- En la presente investigación, se contó con datos de choques que incluían poca información relacionada con cada choque, por ejemplo, no se incluían más detalles sobre el tipo de vehículos involucrados y la categorización que debió realizarse se basó en la interpretación

de la descripción realizada en el reporte de los funcionarios de la empresa concesionaria, lo cual limita el número de variables que se pueden analizar para conocer otras relaciones que se pueden estar presentando en la incidencia de choques viales.

8. Recomendaciones

Con base en lo realizado en la presente investigación, se hacen las siguientes recomendaciones:

- Es muy valioso que se cuente con buenos registros históricos digitales y espacialmente referenciados de los choques, además de incluir información completa de los involucrados y datos que sirvan para hacer un análisis más preciso de las causas de los choques.
- En esta investigación se contó con los planos *as-built* del proyecto, sin embargo, para hacer estos análisis en otros sitios, se requiere hacer levantamientos de información que pueden implicar mucho tiempo. Es recomendable que exista un registro georreferenciado de los inventarios viales, con la información que sea realmente de utilidad para análisis de transportes y seguridad vial, facilitando la planificación en la intervención y mejoras en la infraestructura.
- Al momento de iniciar esta investigación, COSEVI solamente contaba con información digital de los choques de un año, es recomendable en una futura investigación, poder realizar una comparación de los resultados obtenidos, pero haciendo el análisis con los datos de COSEVI, con datos del mismo periodo.
- Se recomienda tomar un periodo de análisis más reciente, para ver la variación en los datos de accidentabilidad, que también pueden verse afectados por el hecho de que los usuarios tendrían más experiencia transitando por esta vía que los del periodo analizado en este proyecto.
- Al ser una vía concesionada, los datos de volumen vehicular son los reportados por la empresa, sin embargo, se notó que, en algunas de las estaciones, dichos datos no tienen un comportamiento lógico en cuanto a su crecimiento anual e inclusive se observaron datos muy distintos entre dos estaciones muy cercanas. Se recomienda que en los contratos de concesión se incluya la realización de inventarios y mediciones con estaciones de recuento permanentes del MOPT, lo cual debe garantizar la veracidad de los datos.
- Dados los resultados obtenidos con el análisis utilizando la velocidad límite, tomando en cuenta que no necesariamente los conductores la están respetando y que en algunos tramos se dan cambios muy bruscos en esta velocidad, se recomienda hacer un análisis como el hecho en este proyecto, pero utilizando la velocidad de operación medida en campo. Esto, además permitirá tener los datos de las diferencias entre ambas velocidades. Igualmente, se recomienda hacer análisis en intercambios y rampas.
- Se recomienda hacer un análisis de consistencia de diseño, e inclusive profundizar en los problemas de seguridad vial que presenta la carretera, por medio de una auditoría de seguridad vial, además del análisis de las distancias de visibilidad. También se recomienda hacer análisis de costo-beneficio para priorizar las futuras implementaciones.
- Si bien el análisis de los tramos que presentaron exceso de choques se hizo en ambas direcciones de circulación, se recomienda una revisión del caso en que se presenta

reversibilidad, pues al utilizarse los carriles que fueron diseñados en el sentido opuesto, existen condiciones que no favorecen la visibilidad.

- Se recomienda que, si se aplican medidas de mejora, estas sean analizadas para poder tener datos de Factores de Modificación de Choques.
- Tomando en cuenta que existe la posibilidad de una próxima ampliación de la carretera y que en este momento se encuentra en etapa de negociación, se recomienda que se tome en cuenta las necesidades que presentan los tramos con mayor concentración de choques, considerando que en la mayoría de los casos se requiere modificar la geometría, siendo que en algunos casos pueda requerirse hacer nuevas expropiaciones o movimientos de tierra. Si bien al pasar de dos carriles a cuatro, se elimina la incidencia de choques frontales, el resto de tipos de choques continuarían ocurriendo por problemas de visibilidad, pendientes, entre otros, por lo que deben tomarse en cuenta las recomendaciones de mejoras en radios de curvatura, eliminación de obstáculos, mejora de pendientes, distancias de visibilidad, longitudes de desarrollo de transiciones en las rampas de salida y de los cambios en la cantidad de carriles en los intercambios y zonas de peaje. No debe sacrificarse la seguridad de los usuarios de la carretera por ahorrar en costos y debe tomarse los resultados obtenidos como una ventaja para no repetir los errores cometidos inicialmente en el diseño de la carretera.

9. Referencias

- AASHTO. (2010). *Highway safety manual*. Washington, DC, USA: The American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Aguero-Valverde, J. (2013). Multivariate Spatial Models of Excess Crash Frequency at Area Level: Case of Costa Rica. *Accident Analysis and Prevention*(59), 365-373.
- Aguero-Valverde, J., & Jovanis, P. (2009). Bayesian Multivariate Poisson Lognormal Models for Crash Severity Modeling and Site Ranking. *Transportation Research Record* 2136.
- Aguero-Valverde, J., & Varela Araya, V. (2018). Modelos de frecuencia de choques para segmentos de intersecciones: ruta 34 en Costa Rica. *Ingeniería*, 1(28), 41-59.
- Ahmed, M., Huang, H., Abdel-Aty, M., & Guevara, B. (2011). Exploring a Bayesian Hierarchical approach for developing safety performance functions for a mountainous freeway. *Accident Analysis and Prevention*(43), 1581-1589.
- Carriguiry, A., & Pawlovich, M. (2004). *From Empirical Bayes to Full Bayes: Methods for Analyzing Traffic Safety Data*. Iowa Department of Transportation.
- 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*. Universidad de Costa Rica: Trabajo de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil.
- Chen, Y., & Persaud, B. (2014). Methodology to develop crash modification functions for road safety treatments with fully specified and hierarchical models. *Accident Analysis and Prevention*(70), 131-139.
- Chiou, Y.-C., Fu, C., & Chih-Wei, H. (2014). Incorporating spatial dependence in simultaneously modeling crash frequency and severity. *Analytic Methods in Accident Research*(2), 1-11.
- COSEVI. (2014). *Estrategia para la implementación de medidas de seguridad vial en espacios de incidencia de accidentes de tránsito: Una priorización de la atención*. Costa Rica: Consejo de Seguridad Vial.
- COSEVI. (1 de Julio de 2019). *Observatorio de Seguridad vial*. Obtenido de Estadísticas: <https://www.csv.go.cr/estadisticas>
- El-Basyouny, K., & Sayed, T. (2009). Collision prediction models using multivariate Poisson-lognormal regression. *Accident Analysis and Prevention*(41), 820-828.

- Elvik, R., & Vaa, T. (2004). *Handbook road safety measures* (Primera ed.). Holanda: Elsevier.
- Esri. (16 de Junio de 2019). *ArcGIS Desktop*. Obtenido de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.htm>
- Hu, S., Ivan, J. N., Ravishanker, N., & Mooradian, J. (2013). Temporal modeling of highway crash counts for senior and non-senior drivers. *Accident Analysis and Prevention*(50), 1003-1013.
- Leiva, M. A. (2016). *Análisis de sitios de concentración de choques viales en la Ruta Nacional 2, mediante el método de exceso de frecuencia de choques esperado*. Universidad de Costa Rica: Trabajo Final de Graduación para obtener grado de Licenciatura en Ingeniería Civil.
- López Briega, R. E. (29 de Junio de 2016). *Matemáticas, análisis de datos y python*. Obtenido de Distribuciones de probabilidad con Python: <https://relopezbriega.github.io/blog/2016/06/29/distribuciones-de-probabilidad-con-python/>
- Ma, J., Kockelman, K. M., & Damien, P. (2008). A Multivariate Poisson-Lognormal Regression Model for Prediction of Crash Counts by Severity, using Bayesian Methods. *Accident Analysis and Prevention*(40), 964-975.
- Madriz, B. (2013). *Modelos estadísticos de gravedad de choques viales en las rutas nacionales de Costa Rica*. Universidad de Costa Rica: Trabajo de graduación para obtener grado de Licenciatura en Ingeniería Civil.
- OMS. (2011). *Plan mundial para el decenio de acción para la seguridad vial 2011-2020*. Suiza: Organización Mundial de la Salud.
- Organización Mundial de la Salud. (2018). *Global Status Report on Road Safety*. Francia: OMS.
- Organización Panamericana de la Salud. (2019). *Estado de la Seguridad Vial en la Región de las Américas*. Washington, D.C.: OPS.
- Park, E. S., & Lord, D. (2006). *Multivariate Poisson-Lognormal Models for Jointly Modeling Crash Frequency by Severity*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- PennState Eberly College of Science. (24 de Junio de 2018). *STAT 504 Analysis of Discrete Data*. Obtenido de 6.2.3 - More on Goodness-of-Fit and Likelihood ratio tests: <https://newonlinecourses.science.psu.edu/stat504/node/220/>
- Serhiyenko, V., Ivan, J. N., Ravishanker, N., & Islam, M. S. (2014). Dynamic compositional modeling of pedestrian crash counts on urban roads in Connecticut. *Accident Analysis and Prevention*(64), 78-85.

- Serhiyenko, V., Mamun, S. A., Ivan, J. N., & Ravishanker, N. (2016). Fast Bayesian inference for modeling multivariate crash counts. *Analytic Methods in Accident Research*(9), 44-53.
- Universidad de Cambridge. (19 de Abril de 2019). *MRC Biostatistics Unit*. Obtenido de <https://www.mrc-bsu.cam.ac.uk/software/bugs/the-bugs-project-dic/#q3>
- Varela Araya, 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*. Universidad de Costa Rica: Trabajo Final de Graduación para obtener grado de Licenciatura en Ingeniería Civil.
- Wang, K., Ivan, J. N., Ravishanker, N., & Jackson, E. (2017). Multivariate poisson lognormal modeling of crashes by types and severity on rural two lane highways. *Accident Analysis and Prevention*(99), 6-19.
- Washington, S., Karlaftis, M., & Mannering, F. (2011). *Statistical an Econometric Methods for Transportation Data Analysis*. Estados Unidos: CRC Press.
- Woodworth, G. (12 de Julio de 2019). *The University of Iowa*. Obtenido de Introduction to WinBUGS: <http://homepage.stat.uiowa.edu/~gwoodwor/BBIText/AppendixBWinbugs.pdf>