



**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE OBRAS CIVILES**

**“Relación entre las características del entorno urbano y la ocurrencia de siniestros de tránsito en la ciudad de Temuco”**

**DANIELA SOLEDAD MOLINA SALAS**

**2025**





**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE OBRAS CIVILES**

**“Relación entre las características del entorno urbano y la ocurrencia de siniestros de tránsito en la ciudad de Temuco”**

**TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERO CIVIL**

**Profesor Guía:** Maximiliano Exequiel Lizana Maldonado.

**DANIELA SOLEDAD MOLINA SALAS**

**2025**

**RELACIÓN ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS DEL ENTORNO URBANO Y LA OCURRENCIA DE SINIESTROS DE TRÁNSITO EN LA CIUDAD DE TEMUCO**

**DANIELA SOLEDAD MOLINA SALAS**

**COMISIÓN EXAMINADORA**

**MAXIMILIANO EXEQUIEL LIZANA MALDONADO**

**Profesor Guía**

**MAURICIO ANDRÉS JARA CAMPOS**

Académico Evaluador

**BENJAMÍN ALEJANDRO GÓMEZ LÓPEZ**

Académico Evaluador

**Calificación trabajo escrito :  
Calificación examen :  
Calificación final :**

*Dedicado a mis seres queridos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mi profesor guía, Maximiliano Lizana, quien me orientó durante el desarrollo de este trabajo. Agradezco profundamente su constante disposición para ayudar, su paciencia y sus valiosos consejos, los cuales fueron fundamentales para superar los desafíos que surgieron en el camino.

También quiero agradecer a mi familia, quienes me apoyaron incondicionalmente durante este trabajo y a lo largo de toda mi etapa universitaria.

Por último, a mi pololo, quien siempre me brindó su apoyo emocional, sus consejos y fue un pilar fundamental para mí.

## RESUMEN

El presente trabajo analiza la relación entre las características del entorno urbano y la ocurrencia de siniestros de tránsito en la ciudad de Temuco, motivado por el crecimiento sostenido del parque vehicular y la complejidad creciente de la movilidad urbana. Se recopilaron y analizaron datos de siniestros de tránsito ocurridos entre 2019 y 2023, utilizando información oficial de Carabineros de Chile y de la Comisión Nacional General de Tránsito. Los eventos fueron georreferenciados con el objetivo de identificar zonas críticas dentro de la ciudad. La investigación se centró en 100 intersecciones urbanas, considerando variables de infraestructura, operación y entorno, y aplicando modelos estadísticos de Poisson y Binomial Negativo para determinar los factores que inciden en la siniestralidad.

El análisis permitió identificar siete variables con influencia significativa en la ocurrencia de siniestros de tránsito. Entre las variables de infraestructura destacan cuatro: las intersecciones de tipo “Cruz” y de tipo ‘Y’ registran una mayor frecuencia de siniestros de tránsito en comparación con las de tipo ‘T’; la presencia parcial de medianas en ramas secundarias se asocia a una menor ocurrencia de siniestros de tránsito respecto de su ausencia; y la existencia de pistas exclusivas para giros a la derecha en la rama principal contribuye a disminuir la siniestralidad. En el ámbito operacional, se identificaron dos variables relevantes: los giros a la izquierda, tanto en ramas principales como secundarias, los cuales aumentan la probabilidad de siniestros de tránsito. En cuanto al entorno, se determinó que una mayor cantidad de paraderos cercanos a las intersecciones se relaciona con un aumento en la frecuencia de siniestros de tránsito. Finalmente, el modelo estadístico aplicado permitió cuantificar el impacto de cada variable y establecer criterios de priorización para la intervención en materia de seguridad vial.

A partir de estos hallazgos, se proponen estrategias de intervención orientadas a mejorar la seguridad vial, como la mejora del diseño geométrico de intersecciones, la instalación de medianas, la restricción de giros conflictivos y la reubicación de paraderos. El estudio destaca la importancia de un enfoque integral que combine infraestructura, gestión operacional y planificación urbana, y sugiere que futuras investigaciones incorporen más variables, como el comportamiento humano, y exploren nuevos enfoques de modelación para profundizar en la comprensión de los factores de riesgo y la efectividad de las intervenciones.

## **Índice de contenidos**

|             |                                                                               |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Capítulo 1. | Introducción.....                                                             | 1  |
| 1.1         | Motivación.....                                                               | 1  |
| 1.2         | Descripción del problema.....                                                 | 1  |
| 1.3         | Objetivo general .....                                                        | 2  |
| 1.4         | Objetivos específicos.....                                                    | 2  |
| Capítulo 2. | Antecedentes Generales.....                                                   | 4  |
| 2.1         | Siniestros de tránsito.....                                                   | 4  |
| 2.2         | Análisis espacial de siniestros de tránsito.....                              | 4  |
| 2.3         | Definición de las variables independientes .....                              | 5  |
| 2.3.1       | Variables asociadas a la infraestructura.....                                 | 6  |
| 2.3.2       | Variables asociadas a la operación .....                                      | 6  |
| 2.3.3       | Variables asociadas al entorno .....                                          | 7  |
| 2.4         | Modelos Lineales Generalizados.....                                           | 7  |
| Capítulo 3. | Metodología.....                                                              | 10 |
| 3.1         | Zona de estudio.....                                                          | 11 |
| 3.2         | Recolección de información de siniestros de tránsito .....                    | 12 |
| 3.3         | Elaboración de mapas para el análisis espacial de siniestros de tránsito..... | 13 |
| 3.4         | Elección de las intersecciones viales .....                                   | 15 |
| 3.5         | Creación de base de datos.....                                                | 15 |
| 3.5.1       | Variables asociadas a la infraestructura.....                                 | 16 |
| 3.5.2       | Variables asociadas a la operación .....                                      | 17 |
| 3.5.3       | Variables asociadas al entorno .....                                          | 18 |
| 3.6         | Análisis estadístico exploratorio de datos .....                              | 20 |
| 3.6.1       | Normalización de variables .....                                              | 21 |
| 3.6.2       | Diagrama de cajas.....                                                        | 21 |
| 3.7         | Modelación estadística .....                                                  | 21 |
| 3.7.1       | Modelo de regresión Poisson.....                                              | 22 |
| 3.7.2       | Modelo de regresión Binomial Negativo.....                                    | 22 |
| 3.7.3       | Offset para ajuste de exposición.....                                         | 23 |
| 3.7.4       | Método de máxima verosimilitud.....                                           | 23 |
| 3.7.5       | Interpretación de los parámetros.....                                         | 24 |
| 3.8         | Métricas de desempeño .....                                                   | 25 |
| 3.8.1       | Raíz del error cuadrático medio (RMSE).....                                   | 25 |
| 3.8.2       | Error medio absoluto (MAE).....                                               | 25 |

|             |                                                                                     |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.8.3       | Criterio de información de Akaike (AIC).....                                        | 25 |
| 3.8.4       | Pseudo-R <sup>2</sup> (McFadden's R <sup>2</sup> ) .....                            | 26 |
| 3.9         | Aplicación del modelo.....                                                          | 26 |
| 3.10        | Formulación de propuestas de estrategias de intervención .....                      | 27 |
| Capítulo 4. | Resultados y Discusión.....                                                         | 29 |
| 4.1         | Análisis espacial de la siniestralidad en Temuco .....                              | 29 |
| 4.2         | Base de datos .....                                                                 | 33 |
| 4.3         | Análisis exploratorio .....                                                         | 33 |
| 4.4         | Resultados del modelo Binomial Negativo .....                                       | 39 |
| 4.5         | Propuestas de estrategias de intervención para reducir la siniestralidad vial ..... | 49 |
| Capítulo 5. | Conclusiones.....                                                                   | 52 |
|             | Bibliografía.....                                                                   | 54 |
|             | Anexos.....                                                                         | 57 |

## **Índice de tablas**

|                                                                                                                       |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Tabla 3.1 Números de permisos de circulación en Temuco, periodo 2019-2023. (INE, 2023)....                            | 11     |
| Tabla 3.2 Clasificación de las intersecciones seleccionadas. ....                                                     | 15     |
| Tabla 3.3 Variables explicativas de infraestructura a analizar. ....                                                  | 17     |
| Tabla 3.4 Proyectos utilizados para la elaboración de las variables de operación. ....                                | 18     |
| Tabla 3.5 Variables explicativas de operación a analizar.....                                                         | 18     |
| Tabla 3.6 Variables explicativas de entorno a analizar. ....                                                          | 19     |
| Tabla 4.1 Distribución de frecuencias de las variables de infraestructura. ....                                       | 33     |
| Tabla 4.2 Distribución de frecuencias de las variables de operación. ....                                             | 34     |
| Tabla 4.3 Distribución de frecuencias de las variables de entorno. ....                                               | 35     |
| Tabla 4.4 Resultados del modelo de regresión Binomial Negativo para el conjunto 1 (periodo 2019-2023).....            | 40     |
| Tabla 4.5 Métricas de desempeño del modelo de regresión Binomial Negativo para el conjunto 1 (periodo 2019-2023)..... | 41     |
| Tabla 4.6 Resultados del modelo con siniestros normalizados a un año para el conjunto 1.....                          | 41     |
| Tabla 4.7 Resultados del modelo de regresión Binomial Negativo para el conjunto 2 (periodo 2019-2023).....            | 44     |
| Tabla 4.8 Métricas de desempeño del modelo de regresión Binomial Negativo para el conjunto 2 (periodo 2019-2023)..... | 45     |
| Tabla 4.9 Resultados del modelo con siniestros normalizados a un año para el conjunto 2.....                          | 46     |
| <br>Tabla A. 1 Resultados del conjunto 3.....                                                                         | <br>57 |
| Tabla A. 2 Resultados del conjunto 4.....                                                                             | 58     |
| Tabla A. 3 Resultados del conjunto 5.....                                                                             | 60     |
| <br>Tabla B. 1 Resultados del modelo seleccionado para el periodo 2019-2023.....                                      | <br>62 |

## **Índice de figuras**

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.1 Estructura de la metodología.....                                                                                                                                           | 10 |
| Figura 3.2 Evolución de siniestros de tránsito en Temuco (2019-2023). Información recuperada de: CONASET.....                                                                          | 12 |
| Figura 3.3 Visualización de la diferencia entre la georeferenciación y el registro de siniestros de tránsito de Carabineros en la intersección Manuel Montt y Arturo Prat, Temuco..... | 14 |
| Figura 3.4 Ejemplo de nodo y sus variables presentes.....                                                                                                                              | 19 |
| Figura 4.1 Georeferenciación de siniestros de tránsito de Temuco (2019-2023).....                                                                                                      | 30 |
| Figura 4.2 Mapa de calor de siniestros de tránsito de Temuco (2019-2023). ....                                                                                                         | 30 |
| Figura 4.3 Siniestros de tránsito de Temuco clasificados en cuadrículas (2019-2023). ....                                                                                              | 31 |
| Figura 4.4 Intersecciones analizadas y su respectiva frecuencia de siniestros de tránsito (2019-2023).....                                                                             | 32 |
| Figura 4.5 Diagrama de cajas: variables de infraestructura.....                                                                                                                        | 37 |
| Figura 4.6 Diagrama de cajas: variables de operación.....                                                                                                                              | 38 |
| Figura 4.7 Diagrama de cajas: variables de entorno.....                                                                                                                                | 39 |
|                                                                                                                                                                                        |    |
| Figura C. 1 Efecto porcentual estimado por el modelo a partir de siniestros registrados (2019–2023).....                                                                               | 65 |
| Figura C. 2 Efecto porcentual de las variables significativas estimado por el modelo a partir de siniestros registrados (2019–2023).....                                               | 65 |
| Figura C. 3 Efecto porcentual estimado por el modelo a partir del promedio anual de siniestros registrados (2019–2023). ....                                                           | 66 |
| Figura C. 4 Efecto porcentual de las variables significativas estimado por el modelo a partir del promedio anual de siniestros registrados (2019–2023). ....                           | 66 |

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1 Motivación

La seguridad vial constituye un desafío prioritario para las ciudades en crecimiento, especialmente en contextos urbanos donde el aumento del parque vehicular y la movilidad generan situaciones complejas y de alto riesgo. Temuco, como capital regional del sur de Chile, ha experimentado en la última década un crecimiento sostenido en su población y en la cantidad de vehículos motorizados. Este fenómeno ha traído consigo una mayor complejidad en la gestión del tránsito y un incremento en la exposición a siniestros de tránsito. Comprender los factores que inciden en la ocurrencia de estos eventos resulta fundamental para diseñar estrategias efectivas de prevención y mitigación. La motivación de este estudio radica en la necesidad de aportar evidencia local que permita mejorar la seguridad vial y reducir el impacto social y económico de los siniestros de tránsito en Temuco.

### 1.2 Descripción del problema

Diversos estudios han evidenciado que la siniestralidad vial en Chile presenta patrones asociados a variables como la infraestructura, la operación del sistema vial y las condiciones del entorno (Dufeu, 2019). En Temuco, no se dispone de investigaciones que integren de manera conjunta estas variables, ya que la mayoría de las investigaciones disponibles se centran en aspectos específicos o en áreas localizadas. Por ejemplo, el estudio sobre comportamiento vial presentado por la Mutual de Seguridad a la Municipalidad de Temuco la cual reveló velocidades máximas de hasta 105 km/h<sup>1</sup>. Surge así la pregunta central de este estudio: ¿Qué elementos del entorno urbano podrían ser modificados para reducir la siniestralidad vial en puntos críticos de Temuco? La respuesta a esta interrogante permitirá orientar futuras intervenciones y políticas públicas en la ciudad.

Para abordar el fenómeno de la siniestralidad vial en Temuco, se recopilaron y analizaron datos de siniestros de tránsito ocurridos en la ciudad durante un periodo de cinco años (2019-2023). El proceso incluyó la obtención de datos a través de Carabineros de Chile y de la Comisión Nacional General de Tránsito (CONASET), la georreferenciación de los eventos y la creación de una base de datos para 100 intersecciones viales con variables de infraestructura, entorno y operación. Se realizó un análisis exploratorio de los datos para identificar tendencias, y posteriormente se aplicaron modelos estadísticos, específicamente Poisson y Binomial Negativo, con el fin de determinar la relación entre las variables seleccionadas y la ocurrencia de siniestros. Esta metodología permitió identificar zonas críticas y factores de riesgo asociados a la siniestralidad vial en la ciudad.

El presente informe se organiza en una serie de secciones que permiten abordar de manera sistemática los distintos aspectos del estudio. En primer lugar, se expone el marco teórico y se revisan antecedentes relevantes que permiten contextualizar el estudio. Posteriormente, se describe en detalle la metodología empleada para el análisis de datos y la aplicación de modelos estadísticos. En la sección siguiente, se presentan los resultados obtenidos, acompañados de su respectiva discusión y de propuestas de estrategias de intervención orientadas a reducir la siniestralidad vial en Temuco. Finalmente, se entregan las conclusiones generales del trabajo.

### **1.3 Objetivo general**

Evaluar el efecto de variables del entorno urbano sobre la ocurrencia de siniestros de tránsito ocurridos en intersecciones de la ciudad de Temuco.

### **1.4 Objetivos específicos**

1. Detectar zonas con mayor concentración de siniestros de tránsito a través de georeferenciación en SIG.
2. Identificar características del entorno urbano que influyan en la ocurrencia de siniestros de tránsito, mediante el uso de métodos estadísticos.
3. Proponer estrategias de intervención basadas en los resultados del método estadístico seleccionado.

## **CAPÍTULO 2**

### **ANTECEDENTES GENERALES**

## Capítulo 2. Antecedentes Generales

Este capítulo se organizó en etapas que contribuyeran a contextualizar el problema de estudio, establecer su fundamento teórico y orientar su análisis posterior. En primer lugar, se describe la variable dependiente analizada, definida como número de siniestros de tránsito. Posteriormente, se profundiza en el uso de herramientas de análisis espacial, tales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la estimación de Densidad de Kernel, con el objetivo de identificar zonas críticas y patrones espaciales de riesgo. Luego, se expone el análisis de las variables independientes, clasificadas en tres dimensiones: infraestructura, operación y entorno. Finalmente se presentan los Modelos Lineales Generalizados (GLM), específicamente los modelos de regresión de Poisson y Binomial Negativo.

### 2.1 Siniestros de tránsito

Los siniestros de tránsito constituyen un problema de salud pública de gran magnitud a nivel global y nacional, tanto por su elevada frecuencia como por sus graves consecuencias. En Chile, este término es empleado para referirse a aquellos eventos viales que provocan daños a personas o bienes y en los que participa al menos un vehículo. Esta denominación, promovida por CONASET, resalta el carácter multicausal y prevenible de estos hechos, alejándose de la noción tradicional de “accidente de tránsito”, la cual tiende a transmitir la idea de un suceso fortuito e inevitable. Al enfatizar la responsabilidad de los actores involucrados y la posibilidad de prevenir su ocurrencia mediante una gestión adecuada, el uso del término “siniestro” favorece una comprensión más activa y comprometida de la seguridad vial, lo que a su vez impulsa el diseño e implementación de políticas públicas y conductas orientadas a reducir estos eventos (CONASET, 2025).

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, los siniestros de tránsito son la principal causa de muerte entre personas de 5 a 29 años, y cada año provocan cerca de 1.19 millones de fallecimientos en el mundo, además de dejar entre 20 y 50 millones de personas con lesiones no mortales (World Health Organization, 2023). En Chile, durante el 2023 se registraron 78.238 siniestros de tránsito que dejaron como consecuencia 1.635 personas fallecidas y 45.679 lesionados en las calles, vías o caminos del país, cifras que reflejan la gravedad y persistencia de este fenómeno (CONASET, 2024). Estas cifras no solo reflejan la magnitud del impacto humano asociado a los siniestros de tránsito, sino que también evidencian las importantes consecuencias sociales y económicas que conllevan. La pérdida de vidas, las lesiones permanentes y la sobrecarga en los sistemas de salud y seguridad vial generan costos considerables para el país. Por ello, se vuelve imperativo abordar este problema con políticas públicas integrales y estrategias de prevención efectivas que permitan reducir su ocurrencia y mitigar sus efectos.

### 2.2 Análisis espacial de siniestros de tránsito

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han consolidado como una herramienta clave para el análisis espacial de siniestros de tránsito a nivel global. Estas tecnologías integran datos geográficos con variables contextuales, lo que facilita identificar patrones de riesgo asociados al entorno vial. Una revisión de 70 estudios muestra que los SIG han evolucionado desde simples

plataformas de visualización hasta sistemas complejos capaces de realizar análisis multivariantes y modelación espacial avanzada (Yao et al., 2015). Un caso de estudio realizado en la ciudad de Cascavel, Brasil, utilizó SIG para localizar zonas críticas (*hotspots*) y vincularlas con características demográficas, lo que permitió optimizar la ubicación de una base de bomberos y mejorar la respuesta ante emergencias (Dal' Canton et al., 2020). Otro estudio destaca el papel crítico del análisis espacial en la identificación de áreas de alto riesgo, ya que proporciona valiosos conocimientos para los planificadores de transporte y los funcionarios de seguridad pública, apoyando el desarrollo de estrategias específicas para mejorar la seguridad vial y mejorar las respuestas de los servicios de emergencia (Kamh et al., 2024). En síntesis, los SIG entregan evidencia técnica y territorial indispensable para comprender la distribución de los siniestros y reducir su ocurrencia mediante una gestión urbana más informada y focalizada.

La estimación de densidad de Kernel (KDE, por sus siglas en inglés) se ha consolidado como una de las técnicas más eficaces para detectar concentraciones espaciales de siniestros de tránsito. Se trata de un método no paramétrico que genera una superficie continua de densidad a partir de eventos puntuales sin asumir una forma paramétrica de distribución (Xie y Yan, 2008). Esta técnica fue sistematizada por Silverman (1986), quien lo describe como una técnica eficaz para estimar la densidad de eventos en el espacio, su formulación se presenta la *ecuación (2.1)* donde  $x_i$  representa el valor de la variable  $x$  en la ubicación  $i$ ,  $n$  significa el número total de ubicaciones,  $h$  denota el ancho de banda o parámetro de suavizado,  $K$  representa la función de Kernel.

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (2.1)$$

Diversos estudios empíricos han demostrado la utilidad del análisis espacial para identificar zonas de alto riesgo. En Londres, se utilizó KDE para segmentar el espacio urbano en celdas, lo que facilitó delimitar unidades territoriales de alta siniestralidad (Anderson, 2009). En Brasil, la aplicación de KDE en la autopista BR-277 permitió identificar que los tramos este y oeste concentraban una mayor proporción de accidentes fatales (Andrade et al., 2014). Por otra parte, en Hanoi se empleó una versión ponderada por índice de severidad, lo que mejoró la precisión de los resultados y la priorización de puntos críticos según su gravedad (Le et al., 2019). En conjunto, estos antecedentes validan la capacidad de KDE para revelar *hotspots* de siniestralidad con alto grado de detalle espacial, permitiendo una gestión más eficiente de la seguridad vial basada en evidencia.

### 2.3 Definición de las variables independientes

En el estudio de la frecuencia de siniestros de tránsito, las variables independientes (llamadas factores de riesgo) se agrupan principalmente en tres categorías: infraestructura, operación y entorno, las cuales resultan fundamentales para explicar la ocurrencia de siniestros de tránsito en intersecciones urbanas. Se detallarán cada una a continuación.

### 2.3.1 Variables asociadas a la infraestructura

Los factores de riesgo de infraestructura hacen referencia al diseño geométrico, al equipamiento vial y a los elementos de seguridad de la intersección (Dufeu, 2019), constituyendo un pilar fundamental en la prevención de siniestros de tránsito. El diseño geométrico abarca elementos cruciales como el número y ancho de pistas, el ángulo de intersección, la presencia de medianas, la configuración de los accesos y la adecuada señalización. Un diseño deficiente en estos aspectos puede generar puntos de conflicto y dificultar la toma de decisiones de los conductores, aumentando el riesgo de colisiones. Complementariamente, el equipamiento vial y los elementos de seguridad son esenciales para la gestión del riesgo. Esto incluye la señalización vertical y horizontal (como señales de tránsito y demarcaciones en el pavimento), la iluminación adecuada, las barreras de contención y los dispositivos reductores de velocidad. Estos elementos son vitales para informar y guiar a los usuarios sobre las condiciones de la vía, alertar sobre peligros y regular el flujo de tráfico. La ausencia o el mantenimiento deficiente de estos componentes puede tener un impacto directo en la seguridad vial, contribuyendo a un mayor número de siniestros (World Health Organization, 2018). Además, la implementación de elementos de seguridad específicos, como refugios peatonales, cruces seguros y carriles segregados para ciclistas y motociclistas, busca proteger a los usuarios más vulnerables y reducir la interacción conflictiva con vehículos motorizados, demostrando una alta eficacia en la disminución de la siniestralidad y la gravedad de los accidentes (Turner et al., 2021). En síntesis, una infraestructura vial bien diseñada y equipada es indispensable para crear un entorno de tránsito seguro y mitigar los riesgos de siniestros de tránsito.

Diversos estudios han estudiado estos factores. Según Mitra y Washington (2007), la cantidad de carriles en una vía es un factor relevante en la modelación de accidentes de tráfico, quienes analizaron el impacto del número total de carriles en la frecuencia de colisiones. En su investigación, encontraron que un mayor número de carriles en la vía principal se asocia con un aumento en la probabilidad de accidentes, debido a la complejidad del flujo vehicular. En cuanto a la presencia de medianas o barreras centrales, estudios como el de Retting *et al.* (2003) destacan que estas estructuras contribuyen a reducir la severidad y frecuencia de accidentes, especialmente en vías de alta velocidad, al separar físicamente los sentidos de circulación y disminuir los choques frontales. En cuanto a la presencia de pistas de viraje exclusivos para giros, estudios como el de Kumara y Chin (2003) indican que la existencia de carriles dedicados para giros a la izquierda y derecha disminuye notablemente la incidencia de accidentes, al facilitar maniobras más seguras y ordenadas. Además, la complejidad geométrica de las intersecciones, medida a través del número de accesos o entradas, ha sido identificada como un factor que incrementa la probabilidad de colisiones, tal como lo reporta el análisis de Greibe (2003). En resumen, la configuración geométrica de las vías, incluyendo el número de carriles, la presencia de medianas y carriles de giro, así como la complejidad de accesos, son variables clave para entender y predecir la accidentabilidad en intersecciones viales.

### 2.3.2 Variables asociadas a la operación

Los factores de riesgo de operación en una intersección comprenden características como el flujo vehicular y peatonal, las condiciones de visibilidad, así como el tipo y funcionamiento del control del tránsito (Dufeu, 2019). Diversos estudios han analizado estos factores operativos. Chen y Xie (2016) destacan que un alto volumen de flujo vehicular incrementa la probabilidad de accidentes

debido a la mayor complejidad y densidad del tránsito, lo que genera más puntos de conflicto y reduce los márgenes de reacción de los conductores. Además, el flujo peatonal también representa un riesgo significativo, especialmente en zonas urbanas donde la interacción entre peatones y vehículos es constante y puede derivar en siniestros si no se gestionan adecuadamente los cruces y tiempos de paso. En cuanto a la visibilidad, el informe de la FHWA (2006) resalta que una iluminación deficiente y obstáculos visuales incrementan la probabilidad de colisiones en intersecciones, ya que limitan la capacidad de los conductores para detectar otros usuarios y señales de tránsito a tiempo. Por otro lado, Antonucci *et al.* (2004) evidencian que un control eficiente del tránsito, mediante semáforos y señalización adecuada, reduce la incertidumbre y mejora la coordinación entre usuarios, disminuyendo la ocurrencia de accidentes. Es importante también considerar el mantenimiento y correcto funcionamiento de estos dispositivos, ya que fallas técnicas o desajustes pueden generar confusión y aumentar el riesgo de siniestro. Por lo tanto, es fundamental una gestión integral y coordinada de estos factores operativos para mejorar la seguridad en las intersecciones viales y disminuir la siniestralidad.

### 2.3.3 Variables asociadas al entorno

Los factores de riesgo del entorno hacen referencia al uso del suelo circundante a la intersección y a la presencia de servicios que pueden influir en el nivel de conflictos y la accidentabilidad, tales como establecimientos educativos, paraderos de transporte público, zonas comerciales entre otros (Dufeu, 2019). La distribución espacial de estos elementos determina en gran medida la magnitud de los flujos peatonales y vehiculares. Las zonas con alto uso comercial o institucional suelen presentar una mayor concentración de peatones y vehículos, lo que eleva significativamente el riesgo de colisiones, especialmente cuando la infraestructura vial no está adaptada a estos flujos mixtos (Ewing y Dumbaugh, 2009). Los paraderos de buses, por su parte, generan interrupciones frecuentes en el flujo vehicular y movimientos peatonales intensos en su entorno inmediato, los cuales pueden amplificar las interacciones conflictivas si carecen de señalización, demarcación y diseño adecuados (Anis et al., 2025). La proximidad de centros educativos incrementa el riesgo debido a la presencia de escolares que realizan trayectos frecuentes y muchas veces espontáneos, lo cual requiere la implementación de cruces peatonales controlados y medidas de seguridad específicas (Clifton y Kreamer-Fults, 2007). El entendimiento integral de estas variables permite planificar intervenciones que mejoren la seguridad peatonal y vehicular en zonas urbanas con alta exposición al riesgo.

### 2.4 Modelos Lineales Generalizados

Los modelos lineales generalizados (GLM, por su sigla en inglés) introducidos por Nelder y Wedderburn (1972) forman parte de las herramientas fundamentales de la modelación estadística, la cual permite analizar y comprender fenómenos complejos en diversas disciplinas científicas. Entre sus aplicaciones más comunes se encuentran los modelos de regresión, utilizados para estudiar la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes. La regresión lineal tradicional, que asume normalidad y continuidad en la variable dependiente, es un caso particular dentro del marco de los GLM. Este enfoque presenta limitaciones cuando la variable dependiente es discreta, categórica o tiene una distribución no normal. Frente a esto, los GLM amplían el marco de la regresión lineal, permitiendo modelar una mayor variedad de distribuciones,

como la Poisson y Binomial Negativo, y utilizar funciones de enlace adecuadas para cada caso (Dobson y Barnett, 2018). En definitiva, los GLM amplían las capacidades del análisis estadístico al adaptarse a una mayor diversidad de datos, lo que los convierte en una herramienta clave en investigaciones aplicadas.

El análisis de siniestros de tránsito mediante técnicas estadísticas ha sido fundamental para identificar factores de riesgo y proponer estrategias orientadas a mejorar la seguridad vial. Dado que los siniestros de tránsito corresponden a eventos discretos, su estudio requiere enfoques metodológicos que consideren la naturaleza de los datos de conteo, como los modelos lineales generalizados y, en particular, los modelos de regresión para datos de conteo. A través de la modelación estadística, es posible cuantificar el impacto de distintos factores sobre la ocurrencia de estos eventos, lo que facilita la priorización de intervenciones en puntos críticos de la red vial y la toma de decisiones informadas. En el contexto chileno, diversos estudios han aplicado estos modelos para comprender la siniestralidad vial. Por ejemplo, (Martínez, 2020) analizó la frecuencia de siniestros de tránsito en intersecciones urbanas de Concepción utilizando modelos de regresión Binomial Negativo, identificando variables significativas como el número de pistas de la rama secundaria, la presencia de mediana en la rama principal y secundaria, y el tipo de zona (comercial o mixta). A nivel internacional, Lord y Mannering (2010) revisaron aplicaciones de modelos de conteo en la seguridad vial en Estados Unidos, destacando su utilidad para identificar puntos críticos y evaluar el impacto de intervenciones viales. En consecuencia, la aplicación de modelos estadísticos en el estudio de siniestros de tránsito se ha consolidado como una herramienta indispensable para la ingeniería de transporte y la gestión urbana, permitiendo abordar de manera más efectiva los desafíos asociados a la seguridad vial.

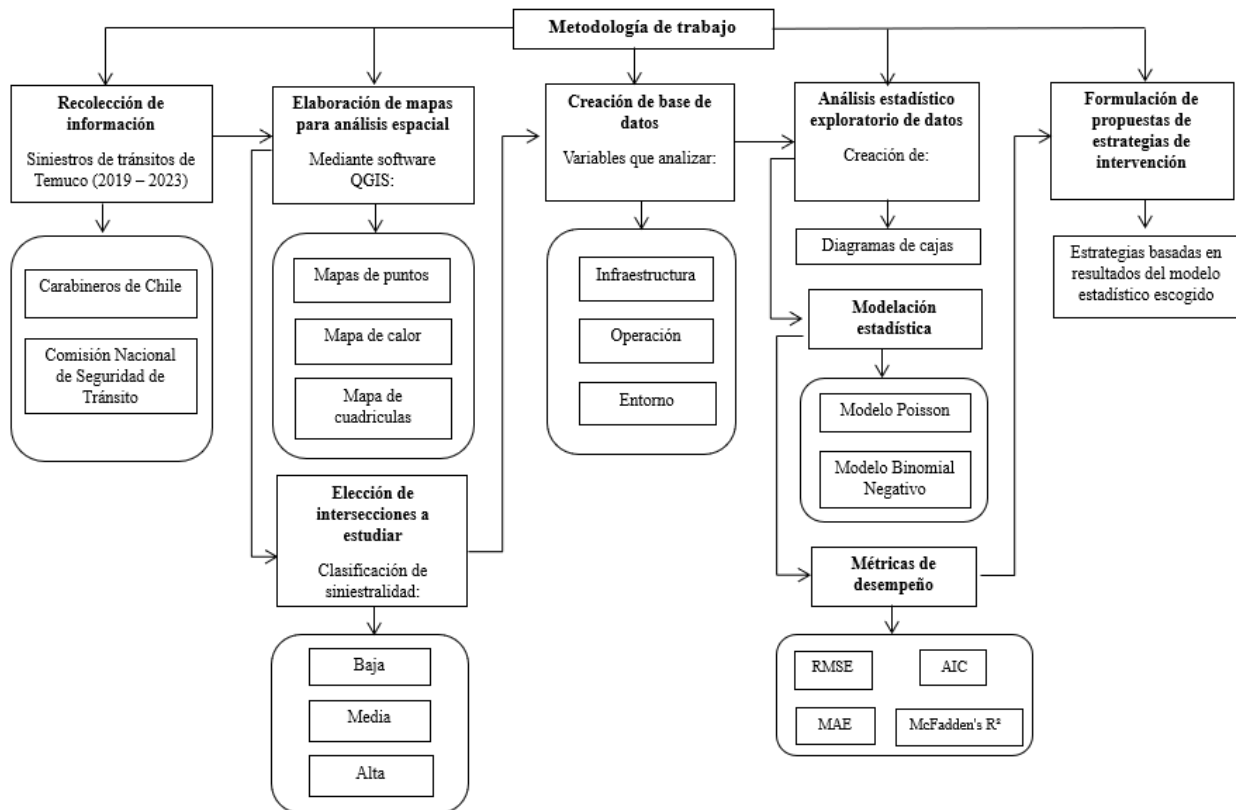
Entre las alternativas disponibles para modelar la frecuencia de siniestros de tránsito, los modelos Poisson y Binomial Negativo se han consolidado como enfoques fundamentales dentro de los modelos lineales generalizados (Lord et al., 2005). Estas metodologías permiten analizar datos de conteo considerando tanto la naturaleza discreta de los siniestros como la posible presencia de sobre dispersión en la información. El modelo Poisson suele emplearse como punto de partida por su sencillez y facilidad de interpretación, mientras que el Binomial Negativo ofrece una solución más flexible cuando la variabilidad observada supera la esperada bajo el supuesto Poisson (Hilbe, 2011)

# **CAPÍTULO 3**

## **METODOLOGÍA**

### Capítulo 3. Metodología

El desarrollo metodológico se estructuró de la siguiente manera. En primer lugar, se realizó la recolección de datos de siniestros de tránsito para la ciudad de Temuco, abarcando un periodo de cinco años (2019-2023), utilizando fuentes oficiales para asegurar la calidad y representatividad de la información. Posteriormente, se elaboraron mapas de puntos, de calor y de cuadrículas para el análisis espacial, permitiendo identificar zonas críticas y patrones de concentración de siniestros. A continuación, se seleccionaron 100 intersecciones viales considerando distintos niveles de siniestralidad. Se procedió a la creación de una base de datos, incorporando variables asociadas a la infraestructura, operación y entorno urbano, obtenidas a partir de imágenes satelitales y de proyectos oficiales. El análisis estadístico exploratorio se llevó a cabo utilizando el software R, aplicando técnicas de normalización y visualización gráfica para evaluar la pertinencia de las variables. Finalmente, se implementaron modelos de regresión de Poisson y Binomial Negativo para analizar la frecuencia de siniestros, complementando el estudio con métricas de desempeño y la formulación de propuestas de mejora basadas en los resultados obtenidos y en la revisión de literatura. Véase la Figura 3.1 para mayor claridad.



**Figura 3.1** Estructura de la metodología.

### 3.1 Zona de estudio

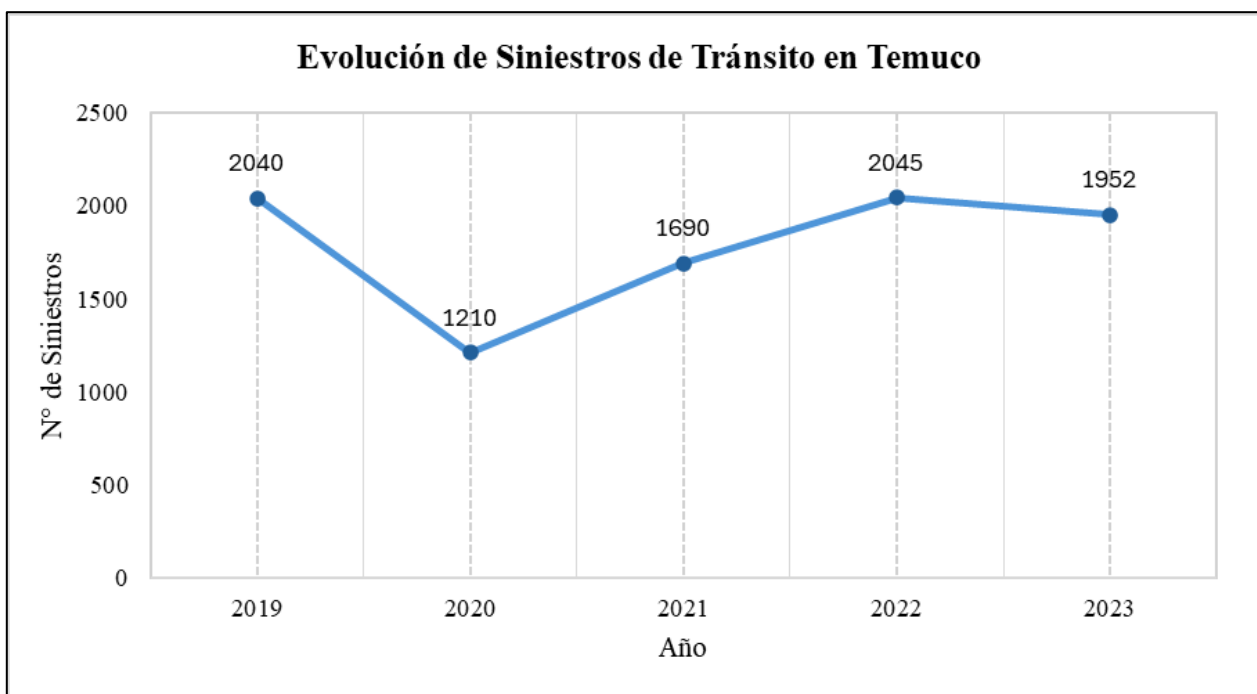
La ciudad de Temuco alcanza una población de 292.518 habitantes (INE, 2025) y ha experimentado un crecimiento sostenido en su parque automotriz durante los últimos años, lo que plantea implicancias relevantes en materia de seguridad vial. Entre los años 2019 y 2023, el número de vehículos motorizados en circulación aumentó en un 17.32%, como se detalla en la Tabla 3.1. Este incremento se relaciona con una mayor preferencia por el uso del automóvil, motivada por percepciones de mayor comodidad, seguridad y rapidez frente a otros modos de transporte. Así lo respalda la encuesta CADEM “El Chile que viene. Automóviles”, en la cual destaca al automóvil como la opción predilecta de desplazamiento en contextos urbanos<sup>1</sup>. Sin embargo, este crecimiento del parque vehicular también se vincula con un aumento en la ocurrencia de siniestros de tránsito, fenómeno que representa una preocupación creciente para la planificación urbana y la gestión de la seguridad vial. De esta forma, el aumento del parque automotriz en Temuco no solo refleja transformaciones en los patrones de movilidad, sino que también implica desafíos concretos en la reducción de la siniestralidad y en el diseño de políticas públicas orientadas a una movilidad más segura y sustentable.

**Tabla 3.1** Números de permisos de circulación en Temuco, periodo 2019-2023. (INE, 2023).

| Año  | Nº de permisos de circulación |
|------|-------------------------------|
| 2019 | 65.474                        |
| 2020 | 75.790                        |
| 2021 | 74.798                        |
| 2022 | 75.674                        |
| 2023 | 76.818                        |

En los últimos años, la cantidad de siniestros de tránsito en la ciudad de Temuco ha presentado variaciones significativas. Entre 2019 y 2023, destaca una disminución abrupta en el año 2020, con un total de 1.210 siniestros, en contraste con los 2.040 registrados en 2019 (CONASET, 2024), como se visualiza en la Figura 3.2. Esta baja se asocia directamente a las restricciones de movilidad impuestas durante la pandemia de COVID-19, lo que evidencia que una reducción en el flujo vehicular conlleva una menor ocurrencia de siniestros. En los años posteriores, se observa un aumento progresivo de los casos, alcanzando un máximo de 2.045 en 2022, seguido de una leve baja a 1.952 en 2023. Estos resultados evidencian la necesidad de analizar en profundidad los factores que inciden en la siniestralidad vial y de fortalecer las estrategias de prevención y control del tránsito en la ciudad para reducir la ocurrencia de siniestros de tránsito.

<sup>1</sup><https://cadem.cl/mas-del-70-de-los-hogares-en-chile-tiene-automovil-y-30-de-las-personas-preve-comprar-uno-este-ano/>



**Figura 3.2** Evolución de siniestros de tránsito en Temuco (2019-2023). Información recuperada de: CONASET.

### 3.2 Recolección de información de siniestros de tránsito

En Chile, la información oficial sobre siniestros de tránsito es recopilada y registrada por Carabineros a través de un procedimiento estandarizado. Desde 2022, el instrumento utilizado es el formulario denominado “Acta para toma de datos en terreno de accidentes en el tránsito y ferroviarios”, el cual es completado por los funcionarios directamente en el lugar del suceso (Carabineros de Chile, 2022). Esta acta recoge datos clave como la fecha, ubicación, tipo de siniestro y otros elementos relevantes para el análisis posterior. Una vez registrados, los datos son publicados en la plataforma digital de acceso libre “Transparencia ProActiva”, gestionado por la misma institución (Carabineros de Chile, 2025). En esta plataforma, la información se organiza en tres reportes principales: por tipo de persona involucrada, por tipo de vehículo y por tipo de accidente. En esta última clasificación, Carabineros clasifica hasta 59 causas distintas de siniestros y tipifica las consecuencias en cinco categorías: fallecido (persona que muere hasta 48 horas después del evento), grave (lesiones con secuelas permanentes o incapacidad mayor a 30 días), menos grave (lesiones que implican entre 7 y 30 días de incapacidad), leve (lesiones con incapacidad de hasta siete días) e ileso (persona sin lesiones). Este sistema permite generar una base de datos detallada, para su posterior utilización en diversos análisis y aplicaciones relacionadas con la seguridad vial.

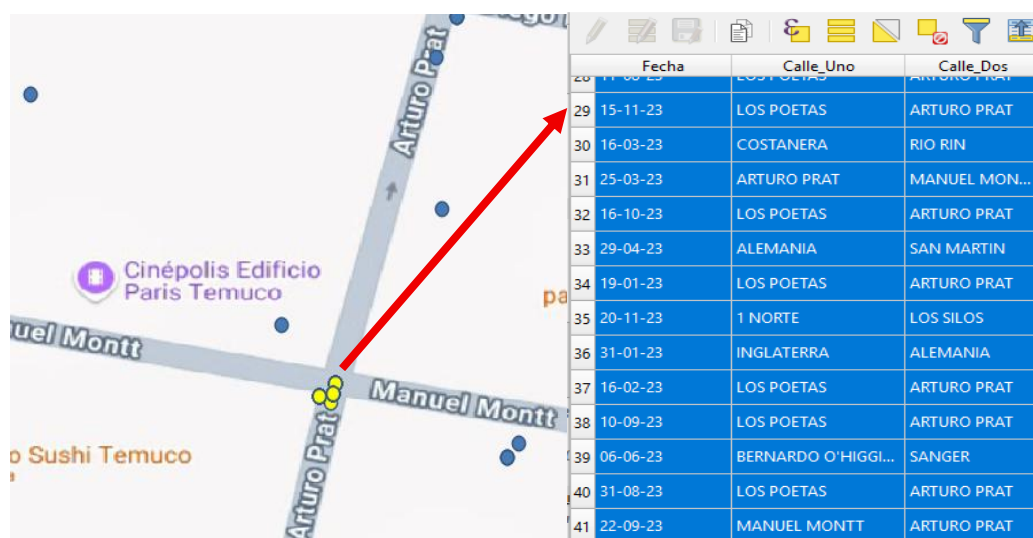
CONASET es el organismo responsable del análisis y difusión de los datos de siniestros de tránsito en Chile. Una vez que la información es recolectada por Carabineros, este organismo se encarga a través de su Observatorio de Seguridad Vial, de procesar los registros con el fin de generar conocimiento técnico y estadístico. Además, desarrolla estudios de comportamiento y análisis

geoespacial que permiten identificar patrones y zonas de mayor riesgo (CONASET, 2025). La publicación de informes especializados facilita la toma de decisiones informadas por parte de autoridades y especialistas en seguridad vial. Asimismo, la difusión de estos resultados contribuye a sensibilizar a la ciudadanía y a orientar estrategias preventivas.

En el marco de este estudio, se emplearon los datos oficiales publicados por Carabineros para la elaboración de la base de datos, y la información geoespacial procesada por CONASET para el análisis espacial. Para construir la base de datos, se descargaron cinco archivos en formato .xlsx desde la plataforma “Transparencia ProActiva”, denominados “Reporte por tipo de accidente” y correspondientes a los años 2019 al 2023. Se optó por un periodo de análisis de cinco años, considerando que intervalos más extensos podrían reflejar modificaciones significativas en la infraestructura vial. Posteriormente, se aplicó un filtro geográfico para seleccionar únicamente los registros de la ciudad de Temuco, considerando variables como la frecuencia de siniestros, el tipo de evento reportado y el nivel de gravedad asociado, lo que permitió establecer una caracterización inicial de la siniestralidad urbana sobre la cual se desarrollaron los análisis posteriores. Para el análisis espacial, se descargaron las capas “Siniestros Individuales” desde la plataforma ArcGIS de CONASET, filtrando los registros correspondientes al mismo periodo y ciudad previamente mencionados.

### 3.3 Elaboración de mapas para el análisis espacial de siniestros de tránsito

El proceso de obtención y validación de la información georreferenciada presentó desafíos relevantes para el análisis de los siniestros de tránsito en Temuco. El propósito de generar mapas fue visualizar la distribución espacial de los siniestros ocurridos durante el periodo analizado y facilitar la identificación de las zonas con mayor frecuencia de eventos. Al incorporar los datos de siniestros de tránsito descargados desde CONASET como puntos en formato shapefile al programa QGIS, se detectaron discrepancias entre la ubicación geográfica de los siniestros y los nombres de calles registrados en la tabla de atributos. En varios casos, las intersecciones viales asignadas a ciertos puntos no coincidían con la descripción textual del lugar. Si bien muchas de estas diferencias fueron menores, en algunas intersecciones la magnitud del error fue considerable. Un ejemplo destacado es la intersección de “Manuel Montt con Prat”, donde los puntos georreferenciados indicaban 49 siniestros, mientras que la base oficial de Carabineros solo registraba 12. Esta diferencia se observa a manera general en la Figura 3.3, donde se observa el nombre de calles que no corresponden a la intersección. Con el objetivo de corregir estas inconsistencias, se implementó un nuevo proceso de georreferenciación en R utilizando el paquete “ggmap” y una API de Google Maps, asignando coordenadas según los nombres de calles. No obstante, al incorporar estos datos corregidos en QGIS, persistieron errores de ubicación en una parte de los registros. Considerando la recurrencia de estas fallas, se optó por mantener la georreferenciación original entregada por CONASET. Esta decisión se justifica en la necesidad de conservar consistencia metodológica y evitar sesgos derivados de una corrección parcial o inestable.



**Figura 3.3** Visualización de la diferencia entre la georeferenciación y el registro de siniestros de tránsito de Carabineros en la intersección Manuel Montt y Arturo Prat, Temuco.

Se realizó una visita a la oficina de CONASET Temuco con el objetivo de consultar sobre los errores de georreferenciación detectados en los datos. La oficina, ubicada en Cruz #588 y dirigida por Sra. Marcela Contreras Salinas, informó que la gestión de informes y estadísticas corresponde exclusivamente al Observatorio de CONASET en Santiago. Durante la visita, se presentaron las principales funciones que desarrolla la institución en Temuco, entre las que destacan la organización de seminarios y charlas educativas para universidades, jardines infantiles y juntas de vecinos. Además, se realizan capacitaciones con acreditación, orientadas a la prevención de siniestros de tránsito. Así, la visita permitió conocer el alcance local de las actividades de CONASET y aclarar que la gestión de datos estadísticos se centraliza en Santiago, justificando la imposibilidad de resolver los errores de georreferenciación a nivel regional. Asimismo, se indicó que el reporte de siniestros de tránsito correspondiente al año 2024 estará disponible a mediados de 2025, razón por la cual dicho año no fue considerado en el presente estudio. De este modo, la visita permitió comprender el rol preventivo de la oficina local y evidenciar que la resolución de problemas técnicos relacionados con los datos debe gestionarse directamente con la sede central.

La elaboración de los mapas se realizó empleando un método convencional de representación espacial mediante mapas de calor, utilizando la densidad de Kernel en el software QGIS. En primer lugar, se utilizó la herramienta “Combinar capas vectoriales” para unificar los registros de siniestros correspondientes a los años 2019 a 2023. Posteriormente, se aplicó la función de “Interpolación” seleccionando la opción “Mapa de Calor”, con un radio de 400 metros y un tamaño de píxel de 1 en los ejes x e y. Adicionalmente, para ofrecer una perspectiva alternativa sobre la concentración de siniestros, se representaron los datos mediante una cuadrícula de 100 x 100 metros. Para ello, se emplearon las herramientas “Crear cuadrículas” y “Contar puntos” de QGIS, asignando una simbología diferenciada según el nivel de siniestralidad: color verde para baja siniestralidad (1–10 siniestros), color naranja para siniestralidad media (10–25 siniestros) y color rojo para alta siniestralidad (25–60 siniestros). De esta manera, la metodología aplicada permitió visualizar de forma clara y comparativa las áreas con mayor concentración de siniestros, facilitando el análisis espacial y la identificación de zonas prioritarias para la intervención.

### 3.4 Elección de las intersecciones viales

Una vez identificadas las zonas con mayor y menor concentración de siniestros mediante el análisis de distribución espacial, se procedió a la selección de 100 intersecciones viales para el estudio. La elección de este número se fundamenta en la necesidad de obtener una muestra representativa de la red vial urbana de Temuco, considerando tanto la extensión de la ciudad como las limitaciones de tiempo para el desarrollo del trabajo. Asimismo, esta cantidad resulta coherente con lo aplicado en investigaciones previas, como la de Peña (2024) en la ciudad de Los Ángeles, donde se analizaron 128 intersecciones en un contexto urbano de características comparables.

El estudio se centró exclusivamente en intersecciones viales, por lo que solo se consideraron aquellos registros cuya ubicación correspondía al cruce de dos calles, excluyendo eventos asociados únicamente a una calle y un número. La selección de las intersecciones buscó abarcar una amplia variabilidad en la frecuencia de siniestros, incorporando casos de baja, media y alta ocurrencia según rangos definidos por percentiles, tal como se presenta en la Tabla 3.2. De este modo, la metodología adoptada permite trabajar con una muestra representativa, fortaleciendo la identificación de patrones y factores relacionados con la siniestralidad en cruces urbanos de la ciudad de Temuco.

**Tabla 3.2** Clasificación de las intersecciones seleccionadas.

| Clasificación | Frecuencia | Percentil de los datos    |
|---------------|------------|---------------------------|
| Baja          | 1-9        | < 33%                     |
| Medio         | 10 - 25    | $\geq 33\%$ y $\leq 66\%$ |
| Alta          | 26 - 96    | > 66%                     |

Durante el proceso de selección y organización de la información recopilada, se presentaron diversas dificultades relacionadas con la estandarización de los nombres de calles y avenidas. Se detectó que una misma intersección podía estar registrada bajo distintas denominaciones, abreviaturas o incluso errores ortográficos; por ejemplo, la Avenida Pedro de Valdivia se encontraba registrada como “Av. P. de Valdivia” o “avda. Pedro de Valdivia”, mientras que Avenida Inés de Suárez podía figurar como “Inez de Suarez”. Además, en algunas intersecciones, el nombre de una calle variaba según el sentido de circulación, por lo que se debió buscar ambos nombres. Por estas razones, fue necesario realizar una revisión exhaustiva y cuidadosa de los nombres de las vías, con el objetivo de asegurar la correcta identificación y cuantificación de los siniestros asociados a cada intersección.

### 3.5 Creación de base de datos

Las variables independientes utilizadas en el estudio se obtuvieron a partir de dos fuentes principales: imágenes satelitales y proyectos oficiales desarrollados para la zona de estudio por las instituciones estatales SERVIU, SECTRA, y MOP. Estos contenían registros de flujos vehiculares, los que incluían mediciones directas y/o simulaciones de flujo a través del programa SATURN. En

la base de datos, se incorporó una columna denominada “Fuente del flujo”, que identifica el origen de los datos, junto con otra columna que contiene el número identificador asignado a cada intersección dentro del proyecto. Posteriormente, se añadió una columna adicional llamada “ID”, destinada a asignar una identificación secuencial a las intersecciones, con valores que van del 1 al 100. En cuanto a la clasificación de las ramas dentro de cada intersección, se definió como rama principal aquella por la cual ingresaba el mayor flujo vehicular, y como rama secundaria la que presentaba un flujo menor, aplicable a intersecciones semaforizadas. Para las intersecciones reguladas por prioridad, se consideró como rama prioritaria aquella que contaba con la preferencia de paso.

La selección de las variables independientes utilizadas en este estudio para la elaboración de la base de datos se fundamentó en el estudio previo de Dufeu (2019), quien analizó un total de 36 variables en una muestra de 273 intersecciones. Sin embargo, en el presente estudio no fue posible incorporar la totalidad de dichas variables, sino únicamente aquellas accesibles en función de la disponibilidad de información y del tiempo asignado. En este sentido, variables como la densidad peatonal, el nivel de visión y el número de fases del semáforo no fueron incorporadas. En su lugar, se añadieron las variables tipo de control, número de movimientos y número de comercios, al considerarse pertinentes para este estudio. A continuación, se describe el procedimiento seguido para la obtención de las 23 variables seleccionadas para el análisis.

### 3.5.1 Variables asociadas a la infraestructura

Para la caracterización de las 11 variables de infraestructura vial en los puntos analizados, se utilizaron imágenes satelitales obtenidas a través de la plataforma Google Maps, las cuales ofrecieron una vista de alta resolución del entorno. Las variables asociadas a la infraestructura seleccionadas para el análisis, junto con su respectiva etiqueta, se detallan en la Tabla 3.3.

La variable “Número de pistas” para la rama principal y secundaria fue desagregada en tres columnas. La primera corresponde al número total de pistas en el acceso 1, definido como aquel que presenta la mayor cantidad de pistas. La segunda columna representa el número total de pistas en el acceso 2. La tercera columna corresponde al promedio entre ambos accesos, redondeado al número entero con el objetivo de evitar valores decimales. Esta estrategia de clasificación se implementó debido a que se identificaron 32 intersecciones en las cuales la cantidad de pistas en la rama principal variaba entre accesos, y 18 intersecciones con diferencias en la rama secundaria. En función de lo anterior, se consideró pertinente realizar esta clasificación con el propósito de evaluar si dichas diferencias pudieran tener algún efecto en los resultados del análisis posterior.

La variable “Mediana” en la rama principal y secundaria presentó una situación similar. Se identificaron tres intersecciones en las que solo existía mediana en uno de los accesos de la rama principal, y siete intersecciones en las que esto ocurría en la rama secundaria. Por este motivo, se incorporó una categoría adicional denominada “Parcialmente con mediana”, con el fin de reflejar adecuadamente estas configuraciones en el análisis.

**Tabla 3.3** Variables explicativas de infraestructura a analizar.

| Nombre de variable                                | Valor  | Etiqueta                            | Fuente                              |
|---------------------------------------------------|--------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Tipo de intersección                              | 1      | Intersección en T                   | Imágenes satelitales de Google Maps |
|                                                   | 2      | Intersección en Cruz                |                                     |
|                                                   | 3      | Intersección en Y                   |                                     |
| Número de ramas de acceso                         | 2 - 7  | Número de accesos a intersección    |                                     |
| Número de pistas de la rama principal             | 2 - 11 | Número total de pistas por acceso 1 |                                     |
|                                                   | 2 - 9  | Número total de pistas por acceso 2 |                                     |
|                                                   | 2 - 10 | Promedio de pistas de ambos accesos |                                     |
| Número de pistas de la rama secundaria            | 2 - 7  | Número total de pistas por acceso 1 |                                     |
|                                                   | 2 - 5  | Número total de pistas por acceso 2 |                                     |
|                                                   | 2 - 6  | Promedio de pistas de ambos accesos |                                     |
| Mediana en rama principal                         | 0      | No existe                           |                                     |
|                                                   | 1      | Existe parcialmente                 |                                     |
|                                                   | 2      | Si existe                           |                                     |
| Mediana en rama secundaria                        | 0      | No existe                           |                                     |
|                                                   | 1      | Existe parcialmente                 |                                     |
|                                                   | 2      | Si existe                           |                                     |
| Valla peatonal                                    | 0      | No existe                           |                                     |
|                                                   | 1      | Existe al menos en alguna acera     |                                     |
| Pista exclusiva giro izquierda en rama principal  | 0      | No existe                           |                                     |
|                                                   | 1      | Existe al menos una pista           |                                     |
| Pista exclusiva giro izquierda en rama secundaria | 0      | No existe                           |                                     |
|                                                   | 1      | Existe al menos una pista           |                                     |
| Pista exclusiva giro derecha en rama principal    | 0      | No existe                           |                                     |
|                                                   | 1      | Existe al menos una pista           |                                     |
| Pista exclusiva giro derecha en rama secundaria   | 0      | No existe                           |                                     |
|                                                   | 1      | Existe al menos una pista           |                                     |

### 3.5.2 Variables asociadas a la operación

Para la descripción de las ocho variables operacionales en las intersecciones analizados, se utilizó información proveniente de imágenes satelitales obtenidas mediante la plataforma Google Maps, así como de documentos técnicos. En primer lugar, se recurrió al documento “Mejoramiento infraestructura del transporte público Temuco-Padre Las Casas” disponible en la Biblioteca Digital de Transportes, el cual contenía archivos en formato .xlsx con diagramas de los movimientos vehiculares y sus respectivos flujos de los proyectos 1 y 2 de la Tabla 3.4 (SECTRA Área Sur, 2022). Luego, se debió solicitar el documento “Construcción Circunvalación Temuco” a través del mecanismo de Transparencia Activa a la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, el cual contenía el modelo calibrado de la red de Temuco en el software SATURN. El modelo

incluía los flujos vehiculares para las intersecciones de la ciudad, las cuales se representaron como nodos dentro del sistema. En ciertos nodos, se utilizaron los flujos registrados en terreno (denominados “Count” en SATURN) cuando estaban disponibles, y si no se utilizaron los flujos simulados (“Demand Flow” en SATURN). Las variables asociadas a la operación seleccionadas para el análisis, junto con sus respectivas etiquetas, se presentan en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.4** Proyectos utilizados para la elaboración de las variables de operación.

| Nº | Proyecto                                                                   | Abreviación | Fuente | Año  |
|----|----------------------------------------------------------------------------|-------------|--------|------|
| 1  | Mejoramiento Interconexión Sur Poniente Temuco – Padre Las Casas           | ISP         | SERVIU | 2019 |
| 2  | Mejoramiento Infraestructura Del Transporte Público Temuco-Padre Las Casas | ITP         | SECTRA | 2022 |
| 3  | Construcción Circunvalación Temuco                                         | CCT         | MOP    | 2024 |

**Tabla 3.5** Variables explicativas de operación a analizar.

| Nombre de variable                        | Valor    | Etiqueta                                      | Fuente                              |
|-------------------------------------------|----------|-----------------------------------------------|-------------------------------------|
| Tipo de control en la intersección        | 1        | Semaforizada                                  | Imágenes satelitales de Google Maps |
|                                           | 2        | Cede al paso                                  |                                     |
|                                           | 3        | Pare                                          |                                     |
| Cruces peatonales protegido               | 0        | Ausencia                                      |                                     |
|                                           | 1        | Presencia (Paso peatonal o semáforo peatonal) |                                     |
| Giro a la izquierda en la rama principal  | 0        | No existen giros a izquierda                  | Proyectos: ISP, ITP, CCT            |
|                                           | 1        | Existe al menos un giro a izquierda           |                                     |
| Giro a la izquierda en la rama secundaria | 0        | No existen giros a izquierda                  |                                     |
|                                           | 1        | Existe al menos un giro a izquierda           |                                     |
| Número de movimientos                     | 2 - 18   | Número de movimientos por intersección        |                                     |
| Flujo de la intersección (veq)            | Continuo | Flujo total en la intersección                |                                     |
| Flujo de la rama principal (veq)          | Continuo | Flujo total de la rama principal              |                                     |
| Flujo de la rama secundaria (veq)         | Continuo | Flujo total de la rama secundaria             |                                     |

### 3.5.3 Variables asociadas al entorno

Para la descripción de las cuatro variables del entorno, se utilizó información proveniente de imágenes satelitales obtenidas a través de la plataforma Google Maps, así como datos extraídos del documento técnico “Mejoramiento infraestructura del transporte público Temuco-Padre Las Casas” (2022), previamente mencionado en la Tabla 3.4. De este último, se emplearon

específicamente sus Anexos 2 y 5, los cuales contenían archivos en formato “shapefile” con información relevante sobre variables del entorno. Estos archivos fueron incorporados en Google Earth Pro, donde se delimitaron radios de 50 y 130 metros alrededor de cada intersección, lo que permitió visualizar y cuantificar la presencia de las variables seleccionadas A modo ilustrativo, en la Figura 3.4 se presenta la intersección correspondiente al Nodo “2019”, la cual presenta un paradero dentro del radio de 50 metros, un centro de salud y un establecimiento educacional en el radio de 130 metros. Las variables de entorno consideradas para el análisis, junto con sus respectivas etiquetas, se detallan en la Tabla 3.6.

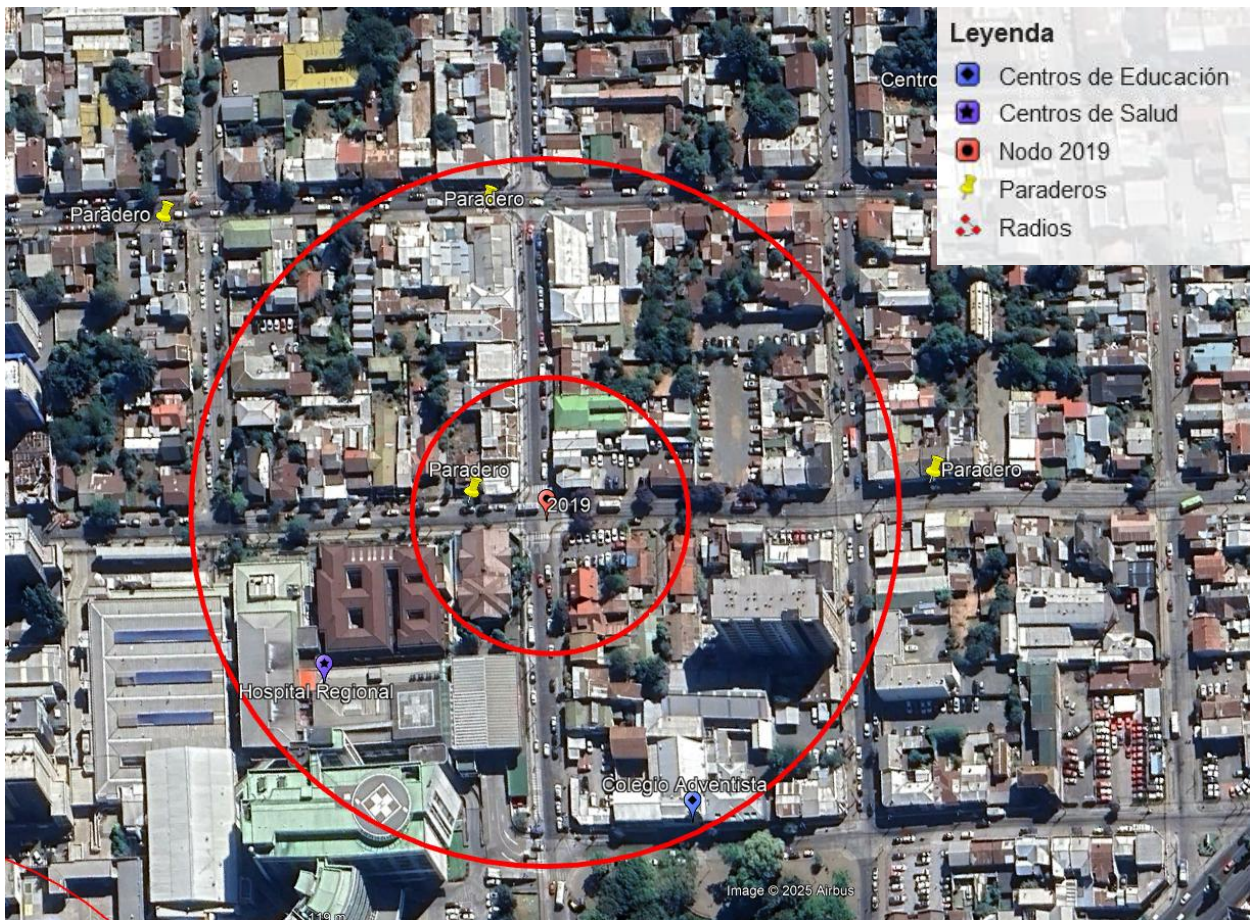


Figura 3.4 Ejemplo de nodo y sus variables presentes.

Tabla 3.6 Variables explicativas de entorno a analizar.

| Nombre de variable | Valor | Etiqueta                                 | Fuente                              |
|--------------------|-------|------------------------------------------|-------------------------------------|
| Tipo de Zona       | 1     | Zona principalmente del tipo residencial | Imágenes satelitales de Google Maps |
|                    | 2     | Zona principalmente del tipo comercial   |                                     |
|                    | 3     | Zona mixta (residencial y comercial)     |                                     |

| Nombre de variable             | Valor | Etiqueta                                                                                                                                       | Fuente                                               |
|--------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Número de paraderos            | 0 - 4 | Número de paraderos en radio de 50 m en torno al centro de la intersección                                                                     | Imágenes satelitales de Google Maps y proyecto: ITP. |
| Número de centros de educación | 0 - 7 | Número de centros de educación en radio de 130 m en torno al centro de la intersección Se incluyen jardines, colegios, liceos y universidades. |                                                      |
| Número de centros de salud     | 0 - 2 | Número de centros de salud en radio de 130 m en torno al centro de la intersección                                                             |                                                      |
| Número de comercios            | 0 - 4 | Número de comercios en radio de 130 m en torno al centro de la intersección. Se incluyen centros comerciales, supermercados y bencineras.      |                                                      |

### 3.6 Análisis estadístico exploratorio de datos

El análisis estadístico exploratorio y descriptivo de una base de datos, utilizando herramientas como *boxplots*, es una etapa fundamental previa al desarrollo de modelos estadísticos. Estas técnicas permiten visualizar la distribución de las variables, identificar posibles asimetrías, valores atípicos y patrones que podrían influir en el comportamiento de los datos. Además, facilitan la detección de errores de registro o inconsistencias que podrían afectar la validez de los resultados del modelo (Tukey, 1981). El análisis gráfico ayuda a comprender la relación entre las variables independientes y la variable dependiente, permitiendo anticipar posibles problemas de multicolinealidad o la necesidad de transformar variables (Cleveland, 1993). Asimismo, estos métodos descriptivos ofrecen una visión general del rango, la dispersión y la tendencia central de los datos, lo que contribuye a una mejor interpretación de los resultados posteriores. Por último, realizar este tipo de análisis previo asegura que las decisiones tomadas en la modelación estadística estén fundamentadas en un conocimiento profundo de la información disponible, aumentando la robustez y confiabilidad de las conclusiones obtenidas.

En este contexto, durante el desarrollo de este estudio se empleó el software R como herramienta principal para el procesamiento, análisis y visualización de los datos vinculados a las variables de entorno urbano y la ocurrencia de siniestros de tránsito en la ciudad de Temuco. La manipulación y transformación de los datos se realizó principalmente mediante la librería *dplyr*, lo que facilitó la generación de subconjuntos, el cálculo de estadísticas descriptivas y la organización de la información según los requerimientos del análisis. En cuanto a la representación gráfica de los resultados, se utilizó la librería *ggplot2* para la elaboración de diagramas de cajas (*boxplots*) que ilustran la distribución y variabilidad de las variables explicativas. Asimismo, la librería *gridExtra* fue empleada para disponer múltiples gráficos en una sola figura, favoreciendo la comparación visual entre variables. Este enfoque permitió organizar y presentar la información de manera clara y comprensible, facilitando la identificación de patrones relevantes, la detección de posibles inconsistencias y la evaluación preliminar de la pertinencia de las variables consideradas para su posterior incorporación al modelo estadístico.

### 3.6.1 Normalización de variables

Normalizar una variable consiste en ajustarla respecto a otra magnitud relevante, con el objetivo de hacer comparables diferentes unidades de análisis bajo condiciones proporcionales. En el caso de los siniestros de tránsito, existe una relación directa entre el volumen de tráfico vehicular y la cantidad de siniestros en intersecciones viales (Rettallack y Ostendorf, 2020). Si no se normaliza el número de siniestros dividiéndolo por el flujo vehicular, las intersecciones con mayor tráfico tenderán a mostrar más siniestros de tránsito solo por la cantidad de vehículos que circulan. Esto puede llevar a interpretaciones erróneas sobre el riesgo real de cada lugar, ya que no se estaría considerando el contexto operativo de cada intersección. Por esta razón, en el presente estudio se procedió a normalizar la cantidad de siniestros dividiéndola por el flujo vehicular total de cada intersección. Esta normalización permite realizar comparaciones más justas y fortalecer la toma de decisiones basada en evidencia. Por lo tanto, aplicar este enfoque es fundamental para evaluar la siniestralidad de manera rigurosa y contextualizada, asegurando que las conclusiones reflejen el riesgo real y no solo el volumen de tránsito.

### 3.6.2 Diagrama de cajas

El diagrama de caja, también conocido como *boxplot*, es una herramienta gráfica fundamental para representar la distribución de un conjunto de datos. Este gráfico muestra los valores mínimos, el primer cuartil (Q1), la mediana (Q2), el tercer cuartil (Q3) y los valores máximos, permitiendo identificar la dispersión, la simetría y la presencia de posibles valores atípicos (Tukey, 1981). La caja representa el rango intercuartílico (entre el primer y tercer cuartil), mientras que las líneas que se extienden desde ella, conocidas como “bigotes”, muestran la variabilidad fuera de ese rango. En el ámbito de la seguridad vial, este tipo de gráfico resulta especialmente útil para evaluar la influencia de variables del entorno urbano sobre la frecuencia de siniestros de tránsito. Por esta razón, en el presente estudio se elaboraron diagramas de cajas para analizar y comparar la distribución de las variables explicativas, lo que permitió identificar patrones, tendencias y posibles anomalías en los datos. Así, el diagrama de caja constituyó un recurso visual preciso y eficaz para el análisis exploratorio, sintetizando información clave sobre la distribución y calidad de los datos utilizados.

## 3.7 Modelación estadística

A continuación, se describen dos modelos lineales generalizados empleados para el análisis de datos de conteo: el modelo de regresión Poisson y el modelo de regresión Binomial Negativo. Además, se introduce el término *offset*, que permite ajustar los resultados del modelo en función de la exposición al riesgo, representada en este caso por el flujo vehicular total. Luego se describe el método de máxima verosimilitud, utilizado para estimar los parámetros del modelo. Finalmente, se aborda la interpretación de los parámetros obtenidos por el modelo.

### 3.7.1 Modelo de regresión Poisson

La función de probabilidad del modelo de Poisson para una variable de conteo  $Y$  está detallado en la *ecuación (3.1)*. Este modelo asume que la media y la varianza de la distribución son iguales, esto se expresa en la *ecuación (3.2)*.

$$P(Y_i = y_i | \lambda_i) = \frac{e^{-\lambda_i} \cdot \lambda_i^{y_i}}{y_i!} \quad (3.1)$$

$$E[Y_i] = Var[Y_i] = \lambda_i \quad (3.2)$$

Donde  $\lambda$  es el parámetro de tasa, modelado en la regresión como se detalla en la *ecuación (3.3)*. Este enlace logarítmico garantiza que  $\lambda > 0$ .  $\beta_0$  es el Intercepto que representa el logaritmo de la media  $\lambda$  esperada cuando todas las variables explicativas son cero.

$$\log(\lambda) = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \dots + \beta_p \cdot X_p \quad (3.3)$$

Se utiliza donde los conteos son no negativos y enteros, como el caso de siniestros de tránsito. Sin embargo, estos datos podrían presentar sobredispersión si la varianza excede la media, lo que invalidaría sus supuestos. Para abordar esto, se puede usar la regresión Binomial Negativo. En conclusión, la regresión de Poisson es una herramienta poderosa para modelar datos de conteo, siempre que se cumpla su supuesto de equidispersión y se verifiquen posibles desviaciones.

### 3.7.2 Modelo de regresión Binomial Negativo

La regresión Binomial Negativo generaliza el modelo de Poisson al incorporar un parámetro de dispersión  $\alpha_i$  permitiendo que la varianza exceda la media. Su función de probabilidad está detallada en la *ecuación (3.4)*.

$$P(Y_i = y_i | \mu_i, \alpha_i) = \frac{\Gamma(y_i + \alpha^{-1})}{\Gamma(\alpha^{-1}) y_i!} \cdot \left(\frac{\alpha^{-1}}{\alpha^{-1} + \mu_i}\right)^{\alpha^{-1}} \cdot \left(\frac{\mu_i}{\alpha^{-1} + \mu_i}\right)^{y_i} \quad (3.4)$$

Donde  $\mu$  es la media, se expresa en la *ecuación (3.5)*.

$$E[Y_i] = \mu \quad (3.5)$$

La media se modela en la regresión como se detalla en la *ecuación (3.6)*. Donde  $\beta_0$  es el Intercepto que representa el logaritmo de la media  $\mu$  esperada cuando todas las variables explicativas son cero.

$$\log(\mu) = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \dots + \beta_p \cdot X_p \quad (3.6)$$

La varianza se detalla en la *ecuación (3.7)* permitiendo sobre dispersión  $\alpha_i > 0$ . Si  $\alpha_i \rightarrow 0$ , el modelo converge a Poisson.

$$Var [Y_i] = \mu + \alpha \cdot \mu^2 \quad (3.7)$$

### 3.7.3 Offset para ajuste de exposición

En modelos de regresión para datos de conteo, como Poisson y Binomial Negativo, el término *offset* se utiliza para ajustar la exposición y estimar tasas en lugar de conteos brutos. Con enlace logarítmico, el *offset* se incorpora como  $\log(exposición_i)$  con coeficiente fijo igual a 1, es decir no se estima, por lo que se suma directamente al predictor lineal, tal como se presenta en la *ecuación (3.8)*.

$$\log(\mu) = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \dots + \beta_p \cdot X_p + \log(exposición_i) \quad (3.8)$$

En este estudio, la exposición corresponde al flujo vehicular total en cada intersección y se incorpora en la ecuación del modelo como  $\log(Flujo_i)$ . De esta manera, el volumen de tránsito queda controlado explícitamente, y los coeficientes estimados reflejan cambios en la tasa de siniestros por unidad de flujo, lo que permite realizar comparaciones adecuadas entre intersecciones con diferentes volúmenes de tránsito.

### 3.7.4 Método de máxima verosimilitud

El método de máxima verosimilitud, propuesto por (Fisher, 1922), es una técnica fundamental para la estimación de parámetros en modelos estadísticos, ampliamente utilizada en el marco de los GLM, como la regresión de Poisson y la regresión Binomial Negativo. Este método consiste en encontrar los valores de los parámetros  $\theta$  que maximizan la probabilidad de observar los datos muestrales  $(y_1, y_2, \dots, y_i)$  bajo los supuestos del modelo. Para ello, se construye la función de verosimilitud, detallada en la *ecuación (3.9)* que representa la probabilidad conjunta de los datos en función de los parámetros desconocidos.

$$L(\theta ; y) = \prod_{i=1}^n f(y_i; \theta) \quad (3.9)$$

En la práctica, se trabaja con el logaritmo de esta función, detallada en la *ecuación (3.10)* ya que simplifica los cálculos sin alterar la posición del máximo.

$$l(\theta) = \ln L(\theta) = \sum_{i=1}^n \ln f(y_i; \theta) \quad (3.10)$$

El proceso de estimación se basa en resolver las ecuaciones de verosimilitud obtenidas, al igualar a cero las derivadas parciales de la función de log-verosimilitud con respecto a cada parámetro, esto se detalla en la *ecuación (3.11)*, donde  $p$  es el número total de parámetros en el vector  $\theta$ , y cada ecuación corresponde a la derivada parcial respecto al  $j$ -ésimo parámetro ( $j = 1, \dots, p$ ). Dado que estas ecuaciones generalmente no tienen solución analítica explícita, se emplean métodos numéricos iterativos, como el algoritmo de Newton-Raphson o el método de Scoring de Fisher, para aproximar las estimaciones de máxima verosimilitud.

$$\frac{\partial}{\partial \theta_j} l(\theta) = 0, \text{ para } j = 1, \dots, p \quad (3.11)$$

### 3.7.5 Interpretación de los parámetros

Al ajustar un modelo de regresión mediante un software estadístico, como R, se obtiene una tabla de resultados que presenta los coeficientes estimados, incluyendo el Intercepto y los parámetros asociados a cada variable explicativa del modelo. El término “Intercepto” representa el logaritmo del valor esperado de la variable dependiente cuando todas las variables explicativas toman el valor cero, correspondiendo a la frecuencia base o de referencia del fenómeno estudiado. Por otro lado, el coeficiente denominado “Estimación”, representa el cambio esperado en el logaritmo de la media de la variable dependiente cuando la variable explicativa aumenta en una unidad, manteniendo las demás variables constantes. Dado que el modelo utiliza una función de enlace logarítmica, para facilitar la interpretación se aplican transformaciones exponenciales a estos coeficientes, de modo que  $\exp(\text{Intercepto})$  refleja la frecuencia esperada en su escala original y  $\exp(\text{Estimación})$  indica el factor multiplicativo que expresa cuánto cambia esa frecuencia por cada unidad adicional en la variable explicativa. Los errores estándar reflejan la precisión de cada estimación. A partir de ellos se calcula el valor de Z que mide cuántas veces el coeficiente estimado es mayor que su error estándar, lo que permite evaluar la relevancia del efecto estimado. El valor de  $p$  indica la significancia estadística del coeficiente, si este es menor a 0.05 sugiere que el efecto del predictor sobre la variable dependiente es estadísticamente significativo y poco probable que se deba al azar.

En la interpretación de los parámetros estimados, las variables explicativas pueden analizarse según su naturaleza: numéricas o categóricas. Para las variables numéricas, el coeficiente estimado indica el cambio relativo en la tasa de siniestros asociado a un incremento unitario en la variable. Por ejemplo, si la variable “Número de paraderos” presenta un coeficiente de 0.15, al calcular  $\exp(0.15)$  se obtiene un valor de 1.16, lo que significa que cada paradero adicional se asocia con un aumento del 16% en los siniestros de tránsito durante el periodo analizado. En el caso de las variables categóricas, la interpretación se realiza en relación con una categoría de referencia. Por ejemplo, si la variable “Tipo de zona: comercial” tiene un coeficiente de -0.4 y  $\exp(-0.4)$  es 0.67, esto implica que las intersecciones ubicadas en zonas comerciales presentan una disminución del 33% en los siniestros de tránsito en comparación con aquellas situadas en zonas residenciales, que actúan como categoría de referencia en el análisis.

### 3.8 Métricas de desempeño

Para evaluar qué tan bien un modelo se ajusta a los datos y la precisión de sus predicciones, se utilizan herramientas estadísticas. Estas permiten comparar diferentes modelos, identificar posibles mejoras y asegurar que los resultados sean confiables y útiles para la toma de decisiones. A continuación, se detallan las métricas de desempeño empleadas en este trabajo.

#### 3.8.1 Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

El RMSE mide el valor medio cuadrático del error y pondera los pronósticos que están más alejados del valor medido. Donde,  $y_i$  son los valores observados,  $\mu_i$  son los valores estimados y  $n$  el tamaño de la muestra, como se detalla en la *ecuación (3.12)*. Un RMSE bajo sugiere que el modelo tiene buena precisión.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu_i)^2} \quad (3.12)$$

#### 3.8.2 Error medio absoluto (MAE)

Mide el promedio de las diferencias absolutas entre los valores observados  $y_i$  y los valores predichos  $\mu_i$ , para una muestra de tamaño  $n$ , como se detalla en la *ecuación (3.13)*. Es una métrica intuitiva que expresa, en promedio, cuán lejos están las predicciones del modelo respecto a los datos reales. Un valor de MAE cercano a 0 indica que las predicciones son, en promedio, muy cercanas a los valores reales.

$$MAE = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \sum_{i=1}^n |y_i - \mu_i| \quad (3.13)$$

#### 3.8.3 Criterio de información de Akaike (AIC)

El AIC es una medida relativa de la calidad del modelo que incorpora una penalización por la complejidad, representada por el número de parámetros  $k$ . Se calcula a partir del valor máximo de la función de verosimilitud del modelo  $L$ , mediante la *ecuación (3.14)*. Se utiliza para comparar modelos, el que tenga el AIC más bajo se considera mejor, siempre que se estén usando los mismos datos.

$$AIC = 2 \cdot k - 2 \ln(\hat{L}) \quad (3.14)$$

### 3.8.4 Pseudo- $R^2$ (McFadden's $R^2$ )

En modelos GLM, como el Binomial Negativo, el coeficiente de determinación  $R^2$  tradicional no es aplicable directamente. En su lugar, se emplean medidas Pseudo basadas en la función de verosimilitud. El Pseudo  $R^2$  de McFadden es uno de los más utilizados y se define en la ecuación (3.15), donde  $L_{modelo}$  es log-verosimilitud del modelo ajustado y  $L_{nulo}$  es el log-verosimilitud de un modelo sin predictores (solo Intercepto). Valores entre 0.2 y 0.4 indican buen ajuste en modelos de conteo. Aunque no es directamente comparable con el  $R^2$  clásico de la regresión lineal, esta métrica permite evaluar la mejora relativa del modelo al incorporar variables predictoras en comparación con un modelo sin ellas.

$$R_{McFadden}^2 = 1 - \ln\left(\frac{L_{modelo}}{L_{nulo}}\right) \quad (3.15)$$

### 3.9 Aplicación del modelo

Se aplicó inicialmente el modelo de regresión de Poisson en R para modelar la frecuencia de siniestros de tránsito, utilizando el paquete MASS y la función `glm()`. Al evaluar el ajuste del modelo, se detectó sobredispersión en los datos, por lo que se descartó la regresión de Poisson y se aplicó el modelo de regresión Binomial Negativo, implementado también en el paquete MASS mediante la función `glm.nb()`, el cual incorpora un parámetro de dispersión que permite modelar adecuadamente la varianza excedente. Para complementar el análisis se calcularon las métricas de desempeño mencionadas anteriormente: RMSE, el MAE, el AIC y el pseudo- $R^2$  de McFadden.

Se realizaron dos conjuntos de variables principales para el modelo de regresión Binomial Negativo. El primer conjunto (desde ahora “conjunto 1”) consideró todas las variables presentadas en las Tabla 3.3, Tabla 3.5 y Tabla 3.6 con la excepción de “Valla Peatonal” y “Cruce Peatonal”, debido a que el análisis exploratorio reveló resultados inconsistentes. Por este motivo, se decidió excluir dichas variables para garantizar la validez de los resultados. En este primer acercamiento, se incorporó el flujo total de la intersección. El segundo conjunto (“conjunto 2”) consistió en incorporar un offset logarítmico basado en el flujo total de la intersección, con el fin de controlar la exposición vehicular al riesgo de siniestros.

Adicionalmente, se evaluaron todas las variables considerando el flujo diferenciado por rama principal y rama secundaria (“conjunto 3”). Luego, se desarrolló un modelo con offset del flujo total de la intersección, incorporando el promedio del número de pistas para ambas ramas (“conjunto 4”). Finalmente, se ajustó un modelo con offset por flujo total, en el cual las medianas parciales fueron reclasificadas como 'sí' y se eliminó la categoría 'parcial' (“conjunto 5”).

Para facilitar la interpretación y comparación de los resultados, los coeficientes estimados por el modelo fueron normalizados a una escala anual. Considerando que la variable dependiente corresponde al número total de siniestros registrados en cada intersección durante el periodo 2019-2023, se procedió a dividir dichos coeficientes por cinco, equivalente al número de años analizados. De este modo, la interpretación de los resultados se expresa en términos de aumento o disminución

de siniestros promedio por año, lo que permite una comparación más directa y significativa entre las distintas variables explicativas.

Como etapa complementaria, se elaboraron gráficos para el modelo final seleccionado mediante el software R, con el propósito de facilitar una visualización clara y una interpretación más efectiva de los resultados obtenidos en el análisis.

### **3.10 Formulación de propuestas de estrategias de intervención**

A partir de los resultados del modelo de regresión seleccionado (Binomial Negativo), las propuestas de estrategias se orientaron a un nivel general, sin centrarse en intersecciones específicas. Se priorizó la intervención sobre variables con impacto estadísticamente significativo, buscando diseñar acciones estratégicas que generen un efecto contundente y sostenido en la reducción de la siniestralidad vial. Para fortalecer estas propuestas, se revisó la literatura sobre casos de intervenciones exitosas en la reducción de siniestros de tránsito.

# **CAPÍTULO 4**

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

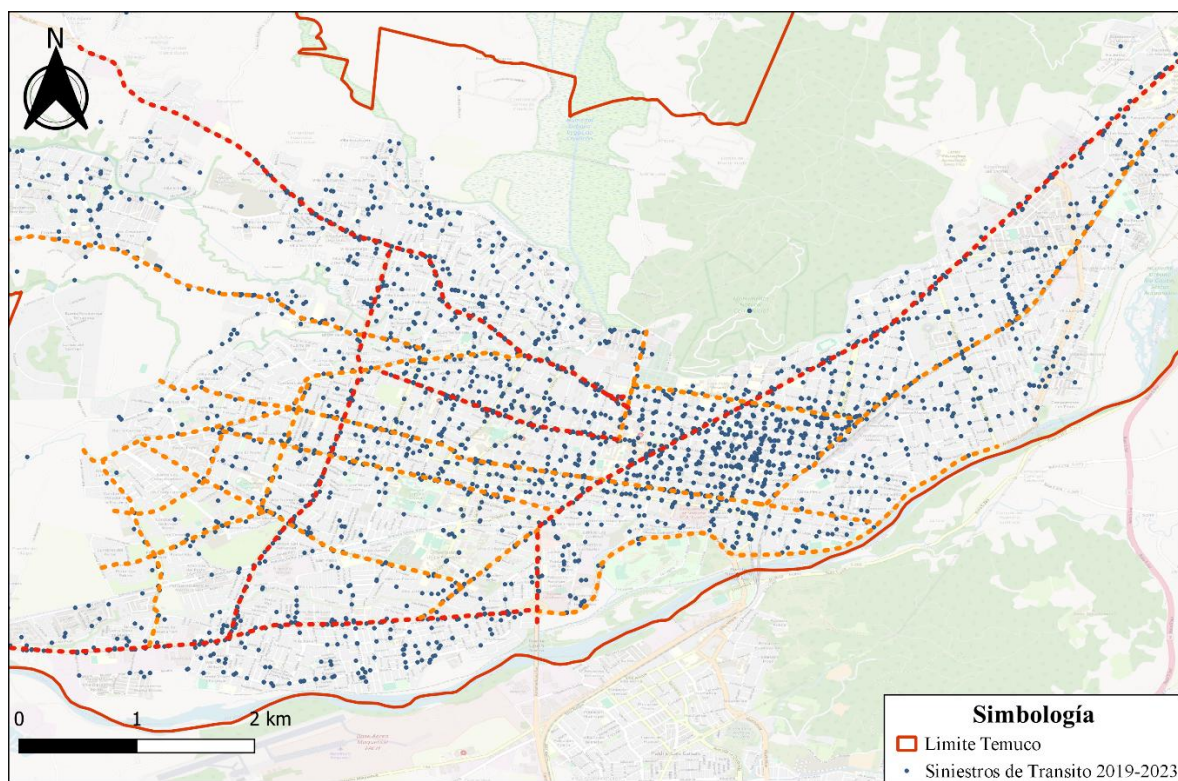
## Capítulo 4. Resultados y Discusión

El capítulo de resultados desarrolla un análisis integral de la siniestralidad vial en Temuco, organizado en distintas etapas que permiten abordar el fenómeno desde diversas perspectivas. En primer lugar, se realiza un análisis espacial utilizando mapas de puntos, mapas de calor y cuadrículas, lo que facilita la identificación de zonas críticas y patrones de concentración de siniestros en la ciudad. Posteriormente, se describe la base de datos elaborada para el estudio, detallando la variable dependiente, correspondiente a los números de siniestros de tránsito, y las variables independientes relacionadas con la infraestructura, la operación y el entorno. Luego, se describe el análisis exploratorio, apoyado en diagramas de caja para visualizar y comprender la relación entre las variables y la siniestralidad. A continuación, se presentan los resultados de los modelos estadísticos aplicados, la identificación de variables significativas y las fórmulas de predicciones de siniestros, junto con la comparación de las métricas de desempeño entre los modelos evaluados. Finalmente, se exponen propuestas de estrategias de intervención fundamentadas en los hallazgos obtenidos, orientadas a la reducción de la siniestralidad vial en la ciudad de Temuco.

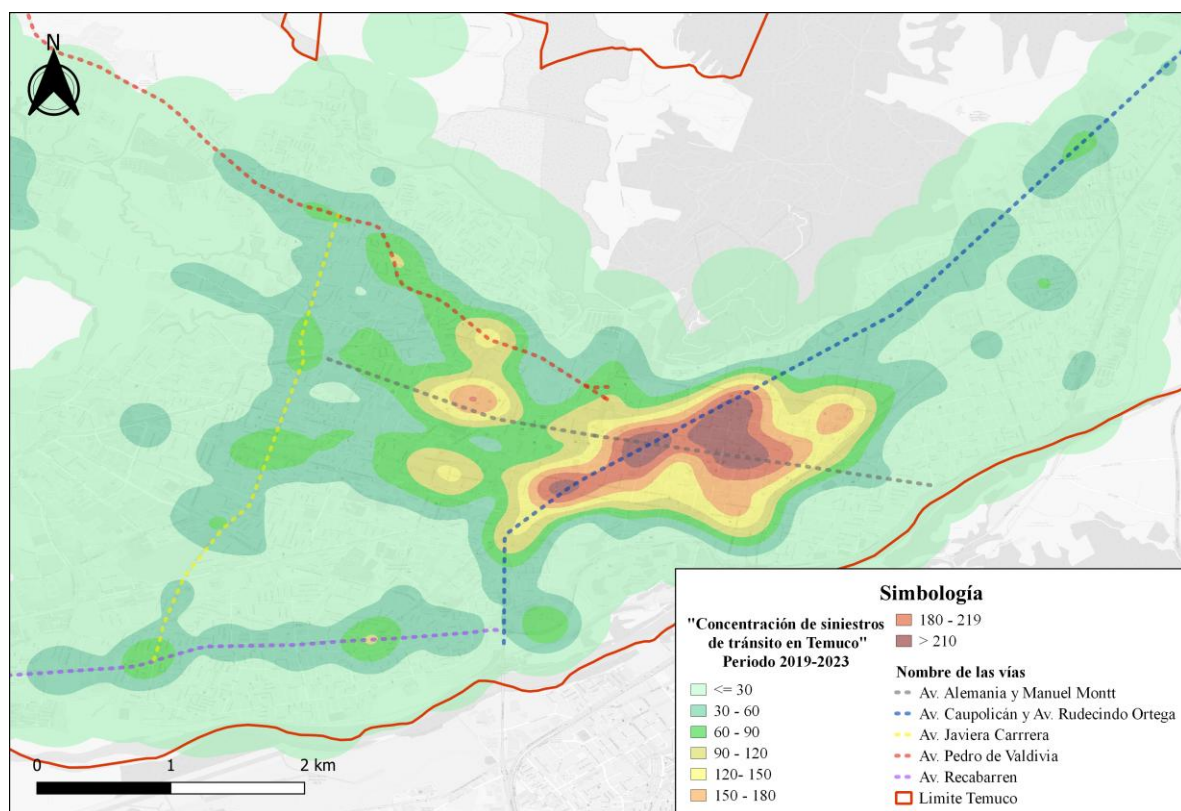
### 4.1 Análisis espacial de la siniestralidad en Temuco

El primer mapa elaborado muestra la distribución espacial de los siniestros de tránsito registrados en Temuco durante el periodo 2019-2023, como se visualiza en la Figura 4.1. Cada punto azul corresponde a la ubicación geográfica de un siniestro, permitiendo una primera aproximación a la identificación de zonas con mayor concentración de siniestros de tránsito. El límite comunal de Temuco se encuentra delimitado mediante una línea roja continua, lo que ayuda a situar los patrones de siniestralidad dentro del área urbana. Además, se destacan las principales avenidas mediante líneas punteadas, diferenciando aquellas con media siniestralidad (color naranja, 10-25 siniestros) y alta siniestralidad (color rojo, 25-60 siniestros), facilitando la lectura del mapa. Esta representación inicial resulta fundamental para orientar el análisis posterior.

El mapa de calor generado representa la distribución espacial de los siniestros de tránsito, como se observa en la Figura 4.2 a través de una escala de colores que va desde el verde claro (baja concentración) hasta el rojo oscuro (alta concentración). Esto facilita la identificación de zonas críticas. Las mayores concentraciones de siniestros de tránsito se localizan en el centro de la ciudad, donde los colores rojo y marrón reflejan más de 180 siniestros registrados en el periodo analizado. En contraste, los sectores periféricos presentan tonalidades verdes y celestes, indicando una menor frecuencia de siniestros. Asimismo, se incorpora una simbología segmentada en intervalos de 30 siniestros, lo que mejora la interpretación cuantitativa del mapa. En conjunto, esta representación cartográfica se convierte en una herramienta visual fundamental para detectar *hotspots* de siniestralidad y jerarquizar zonas de intervención.

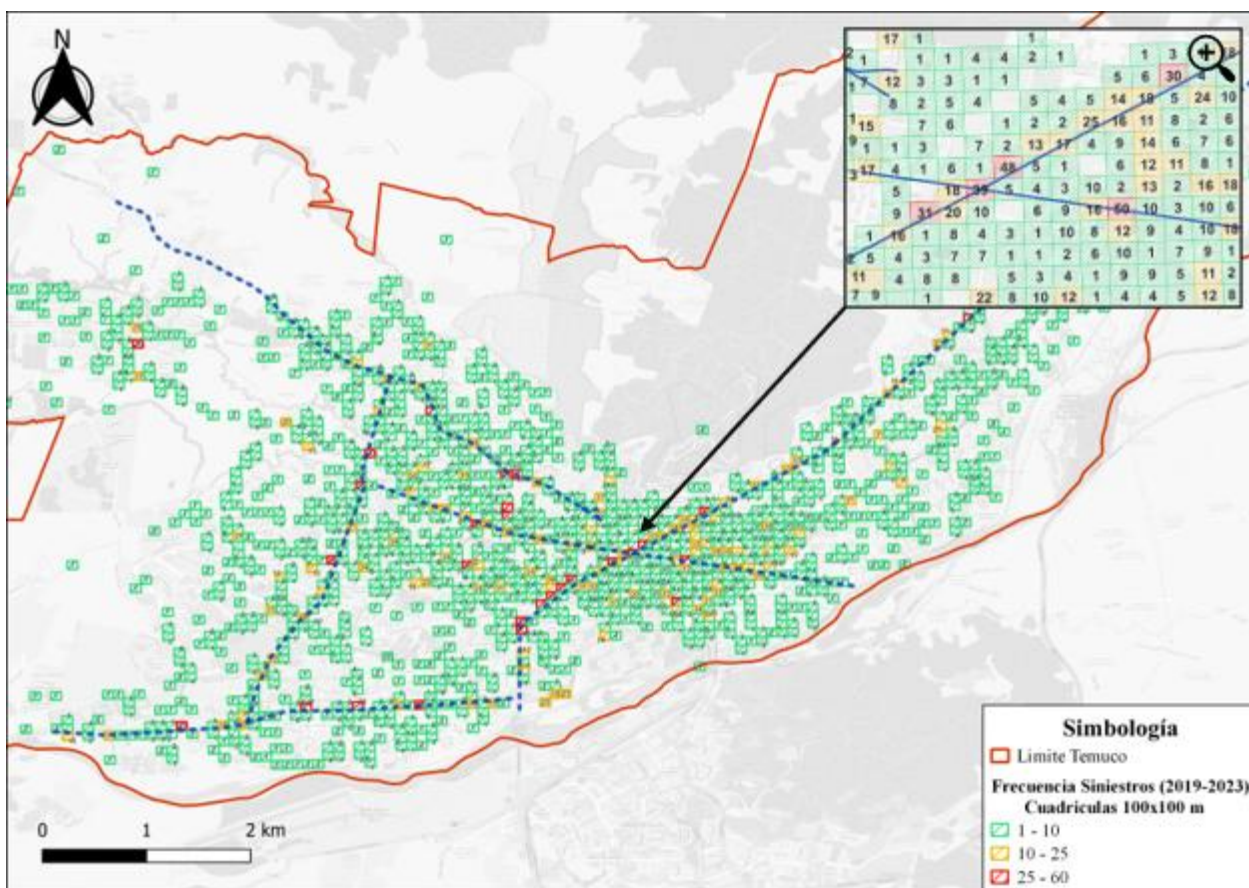


**Figura 4.1** Georeferenciación de siniestros de tránsito de Temuco (2019-2023).



**Figura 4.2** Mapa de calor de siniestros de tránsito de Temuco (2019-2023).

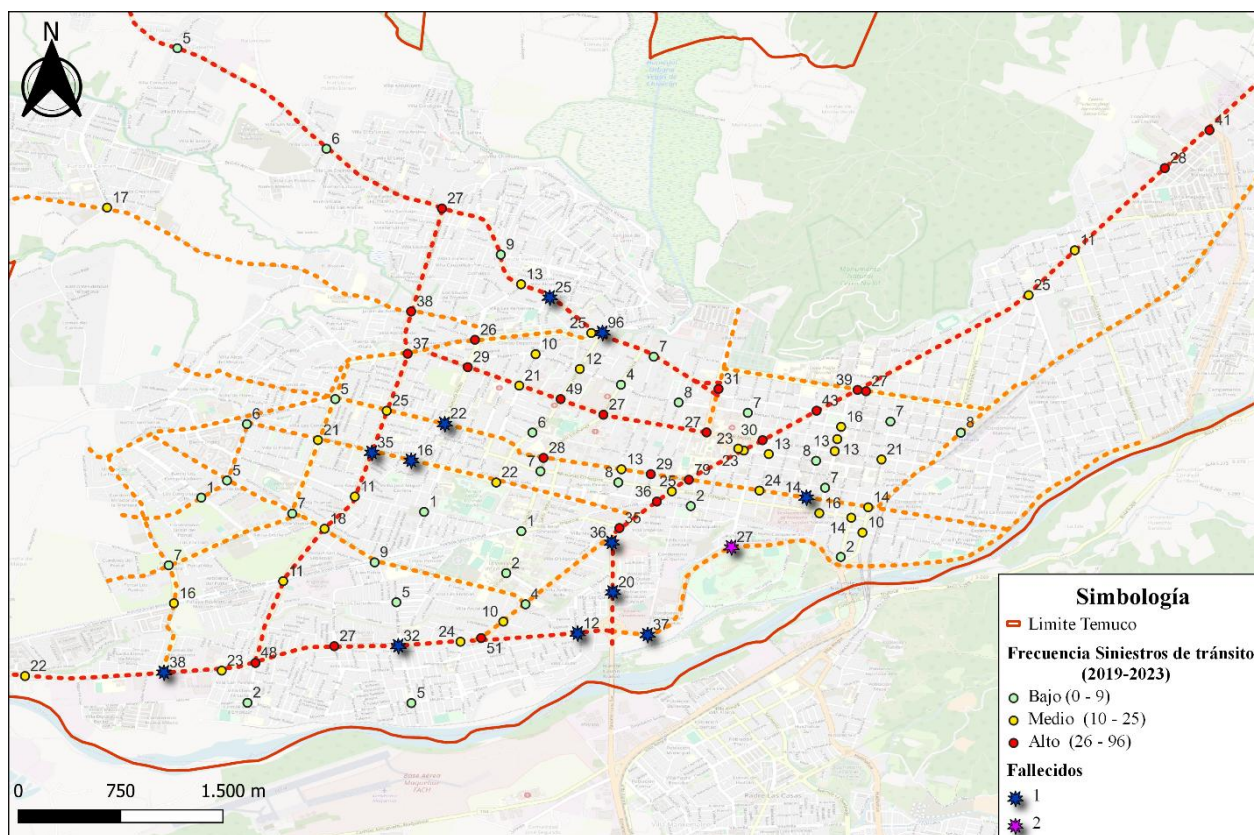
El mapa generado para representar la distribución de siniestros de tránsito de una manera alternativa a los mapas de calor se visualiza en la Figura 4.3, utilizando para ello una grilla de cuadrículas de 100x100 metros como unidad de análisis espacial. En este mapa, cada celda refleja la frecuencia de siniestros ocurridos en su interior, permitiendo una visualización más segmentada y precisa de la siniestralidad vial en Temuco. La simbología empleada clasifica las cuadrículas en tres rangos: verde para baja siniestralidad (1-10 siniestros), amarillo para siniestralidad media (10-25 siniestros) y rojo para alta siniestralidad (25-60 siniestros), mientras que las líneas segmentadas de color azul representan las avenidas principales de la ciudad. A diferencia de los mapas de calor que muestran la densidad de siniestros mediante gradientes de color y tienden a suavizar la información espacial, el uso de cuadrículas permite identificar con mayor exactitud los sectores específicos donde se concentran los incidentes, evitando la dispersión visual y facilitando la delimitación de áreas críticas. Así, la representación mediante cuadrículas ofrece una comprensión más detallada y operativa del fenómeno; no obstante, sigue siendo limitada para visualizar la clasificación de los siniestros de tránsito a nivel de intersección.



**Figura 4.3** Siniestros de tránsito de Temuco clasificados en cuadrículas (2019-2023).

Dado que los mapas de calor y las grillas de cuadrículas presentaban limitaciones para representar con precisión los siniestros de tránsito a nivel de intersecciones específicas, se optó por desarrollar una representación cartográfica más focalizada. Aunque estas visualizaciones previas eran útiles para identificar áreas generales de alta concentración de siniestros, resultaban poco efectivas al

momento de localizar con exactitud los puntos críticos, especialmente en cruces urbanos. Esta falta de precisión dificultaba el diagnóstico puntual de las problemáticas de seguridad vial y limitaba la capacidad de intervención dirigida. Para abordar esta necesidad, se elaboró un nuevo mapa, mostrado en la Figura 4.4, enfocado exclusivamente en las 100 intersecciones seleccionadas para el análisis, correspondientes a intersecciones del área urbana de Temuco. Cada punto representa una intersección e incluye un número que indica la cantidad de siniestros ocurridos entre 2019 y 2023, permitiendo una visualización directa y específica de la magnitud del problema en cada cruce. La simbología empleada distingue tres niveles de siniestralidad: verde para baja (1-9 siniestros), amarillo para media (10-25) y rojo para alta (26-96). Adicionalmente, se resaltaron con mayor tamaño aquellas intersecciones en las que se registraron víctimas fatales, utilizando color azul para un fallecido y rosado para dos fallecidos, con el objetivo de enfatizar la gravedad de estos puntos. Esta representación puntual permite una interpretación clara, directa y comparativa de cada intersección, facilitando la priorización de puntos críticos y la toma de decisiones orientadas a mejorar la seguridad vial. En resumen, este enfoque permite superar las limitaciones de las representaciones previas y proporciona una base sólida para el análisis espacial específico de intersecciones.



**Figura 4.4** Intersecciones analizadas y su respectiva frecuencia de siniestros de tránsito (2019-2023).

## 4.2 Base de datos

La base de datos elaborada constituye una recopilación integral e inédita de información sobre la variable dependiente (número de siniestros de tránsito) y las variables independientes (factores de riesgo) para la ciudad de Temuco. Esta base contempla datos de 100 intersecciones seleccionadas de la ciudad, integrando información proveniente de diversas fuentes, como imágenes satelitales y antecedentes de proyectos urbanos. Respecto a la variable dependiente, se incluye la frecuencia total de siniestros por intersección, su clasificación según nivel de riesgo, tipo de siniestro (colisión, choque, atropello, entre otros) y gravedad de las consecuencias (muertos, heridos graves, leves e ilesos). Las variables independientes, por su parte, abarcan características del entorno urbano, la infraestructura vial y las condiciones operacionales, descritas en detalle en apartados anteriores del informe. De este modo, la estructura y el contenido de la base de datos permiten abordar de manera integral el análisis de la siniestralidad vial en Temuco, facilitando la identificación de patrones y relaciones significativas entre los factores de riesgo y la ocurrencia de siniestros, en base a información confiable y representativa. La base de datos se encuentra disponible para libre acceso en el siguiente [enlace](#).

Durante el proceso de recolección y análisis, se identificaron dos limitaciones relevantes. La primera corresponde a la posibilidad de subregistro de siniestros de tránsito, ya que no existe certeza de que todos los eventos hayan sido efectivamente reportados. Esta situación es especialmente probable en siniestros de menor gravedad, donde los involucrados pueden optar por no realizar la denuncia correspondiente ante Carabineros, lo que afecta la completitud y representatividad de la información disponible. La segunda limitación se relaciona con los cambios que puede experimentar la infraestructura vial a lo largo del tiempo, como la instalación de nuevos semáforos o la apertura de centros comerciales. Por ejemplo, la incorporación de un semáforo en el año 2021 dificulta el análisis de los siniestros ocurridos durante el período de estudio, ya que introduce variaciones en las condiciones viales que no estuvieron presentes en todo el intervalo analizado.

## 4.3 Análisis exploratorio

En primer lugar, se presenta la cantidad de intersecciones correspondientes a cada categoría de las variables de infraestructura, operación y entorno en las Tabla 4.1, Tabla 4.2 y Tabla 4.3, respectivamente. Esto permite dimensionar la representatividad de cada tipo dentro del conjunto total de intersecciones evaluadas.

**Tabla 4.1** Distribución de frecuencias de las variables de infraestructura.

| Nombre de variable        | Etiqueta  | Cantidad |
|---------------------------|-----------|----------|
| Tipo de intersección      | Tipo T    | 23       |
|                           | Tipo Cruz | 72       |
|                           | Tipo Y    | 5        |
| Número de ramas de acceso | 2 - 4     | 91       |
|                           | 5 - 7     | 9        |

| Nombre de variable                                | Etiqueta | Cantidad |
|---------------------------------------------------|----------|----------|
| Número de pistas de la rama principal             | 2 - 6    | 90       |
|                                                   | 7 - 11   | 10       |
| Número de pistas de la rama secundaria            | 2 - 4    | 90       |
|                                                   | 5 - 7    | 10       |
| Mediana en rama principal                         | 0        | 33       |
|                                                   | 1        | 3        |
|                                                   | 2        | 64       |
| Mediana en rama secundaria                        | 0        | 70       |
|                                                   | 1        | 7        |
|                                                   | 2        | 23       |
| Presencia de Valla peatonal                       | No       | 45       |
|                                                   | Si       | 55       |
| Pista exclusiva giro izquierda en rama principal  | No       | 76       |
|                                                   | Si       | 24       |
| Pista exclusiva giro izquierda en rama secundaria | No       | 84       |
|                                                   | Si       | 16       |
| Pista exclusiva giro derecha en rama principal    | No       | 85       |
|                                                   | Si       | 15       |
| Pista exclusiva giro derecha en rama secundaria   | No       | 73       |
|                                                   | Si       | 27       |

**Tabla 4.2** Distribución de frecuencias de las variables de operación.

| Nombre de variable                        | Etiqueta                                      | Valor |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------|
| Tipo de control en la intersección        | Semaforizada                                  | 73    |
|                                           | Cede al paso                                  | 15    |
|                                           | Pare                                          | 12    |
| Cruces peatonales protegido               | Ausencia                                      | 8     |
|                                           | Presencia (Paso peatonal o semáforo peatonal) | 92    |
| Giro a la izquierda en la rama principal  | No                                            | 35    |
|                                           | Si                                            | 65    |
| Giro a la izquierda en la rama secundaria | No                                            | 22    |
|                                           | Si                                            | 78    |
| Número de movimientos                     | 2 - 9                                         | 70    |
|                                           | 9 - 18                                        | 30    |

**Tabla 4.3** Distribución de frecuencias de las variables de entorno.

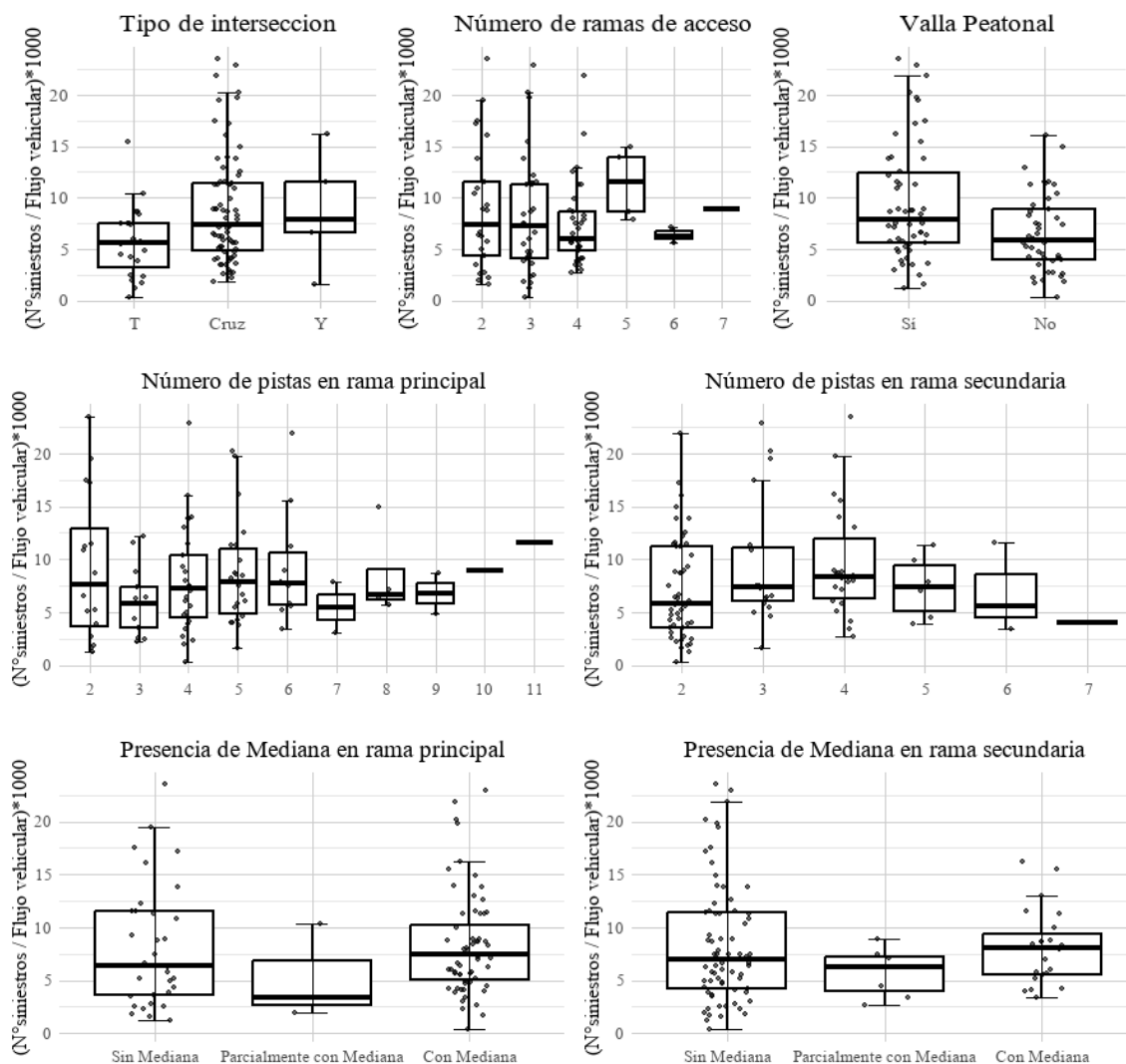
| Nombre de variable             | Etiqueta         | Cantidad |
|--------------------------------|------------------|----------|
| Tipo de zona                   | Tipo residencial | 25       |
|                                | Tipo comercial   | 29       |
|                                | Tipo mixta       | 46       |
| Número de paraderos            | 0                | 35       |
|                                | 1                | 42       |
|                                | 2                | 16       |
|                                | 3                | 6        |
|                                | 4                | 1        |
| Número de centros de educación | 0                | 62       |
|                                | 1                | 24       |
|                                | 2                | 10       |
|                                | 3                | 3        |
|                                | 7                | 1        |
| Número de centros de salud     | 0                | 90       |
|                                | 1                | 9        |
|                                | 2                | 1        |
| Número de comercios            | 0                | 59       |
|                                | 1                | 27       |
|                                | 2                | 10       |
|                                | 3                | 2        |
|                                | 4                | 2        |

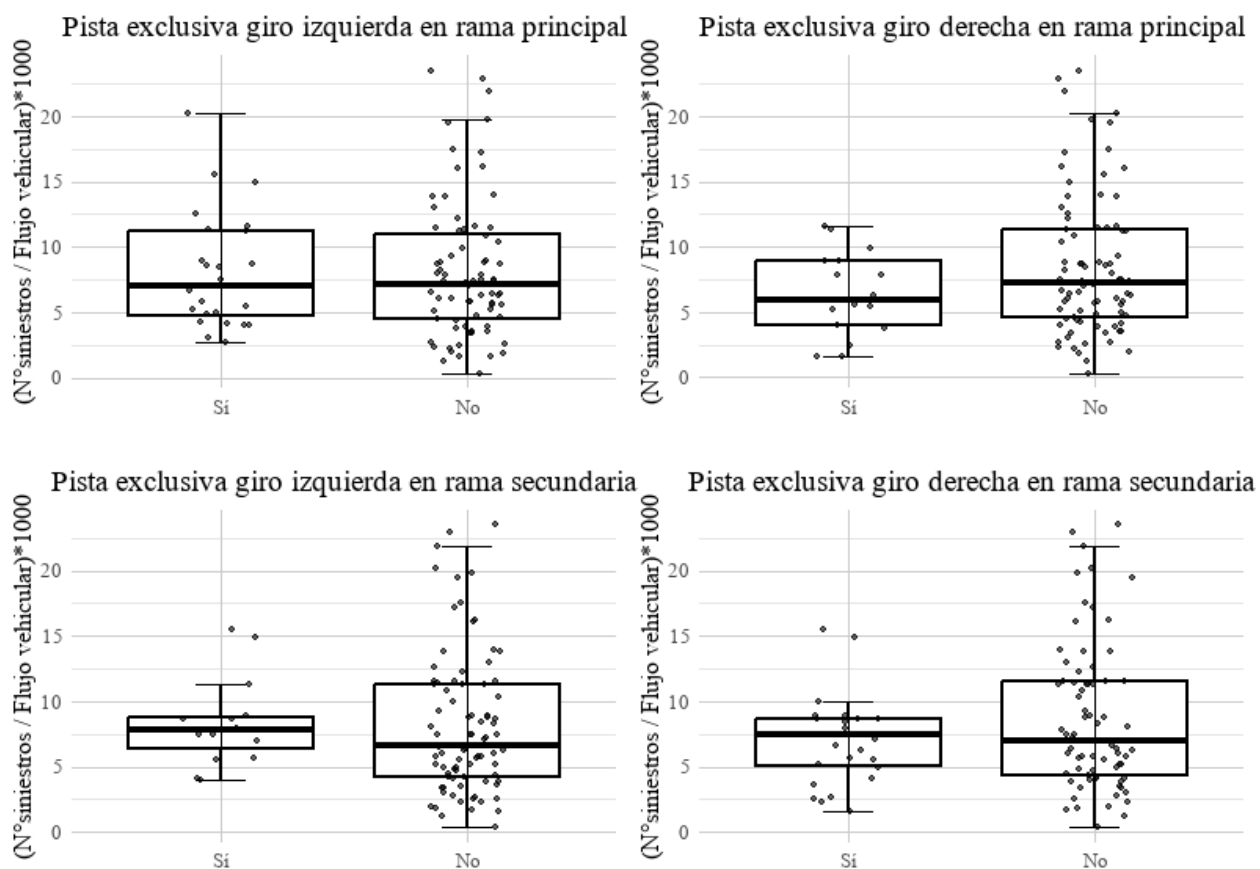
A continuación, se presentan los gráficos de diagramas de cajas, estos permiten visualizar la relación entre las variables de infraestructura, operación y entorno urbano con la siniestralidad vial en las intersecciones de Temuco. La variable dependiente (número de siniestros de tránsito) se presenta normalizada por el flujo vehicular, de modo que cada punto del diagrama de caja corresponde a la tasa de siniestros por cada 1.000 vehículos/hora en una intersección, lo que permite realizar comparaciones apropiadas entre distintos volúmenes de tránsito.

El análisis de las variables de infraestructura, representadas en la Figura 4.5, permite identificar patrones relevantes en la relación de las características físicas del entorno vial y la frecuencia de siniestros en intersecciones urbanas. En primer lugar, se observa que las intersecciones de tipo Y presentan una mayor frecuencia de siniestros en comparación con otros tipos. Este resultado está relacionado con la complejidad geométrica de estos cruces, donde los ángulos agudos y la disposición de las ramas dificultan la visibilidad para conductores y peatones. La mala visibilidad en intersecciones tipo Y, sumada a la posible presencia de obstáculos urbanos puede dificultar la anticipación de movimientos y aumentar la probabilidad de maniobras riesgosas. Por otro lado, no se aprecia una relación lineal clara entre el número de ramas de acceso y la frecuencia de siniestros, lo que indica que estos factores, si bien relevantes, pueden estar modulados por otras características del entorno o de la operación vial. Para la variable valla peatonal los resultados fueron inconsistentes, indicando que su presencia se asocia a incrementos de siniestralidad, lo cual contradice la lógica esperada desde la perspectiva de la seguridad vial. Esta incongruencia puede

explicarse por la falta de información sobre los flujos peatonales en la base de datos, lo que impide controlar adecuadamente la exposición al riesgo de estos usuarios.

Respecto al número de pistas no se aprecia una relación lineal clara con la frecuencia de siniestros. Por otro lado, los datos indican que la siniestralidad tiende a ser mayor en presencia de mediana, tanto en la rama principal como en la secundaria. Este resultado, que contradice lo reportado en la literatura, es similar a lo observado respecto a las vallas. Por ello, es necesario considerar otras variables que puedan estar influyendo, a fin de realizar un análisis más preciso y fundamentado. Finalmente, en cuanto a las pistas exclusivas para giros, se observa que la ausencia de pistas exclusivas para giro a la derecha en la rama principal se asocia con una mayor frecuencia de siniestros, mientras que en la rama secundaria ocurre lo contrario. Un patrón similar se aprecia para las pistas de giro a la izquierda.

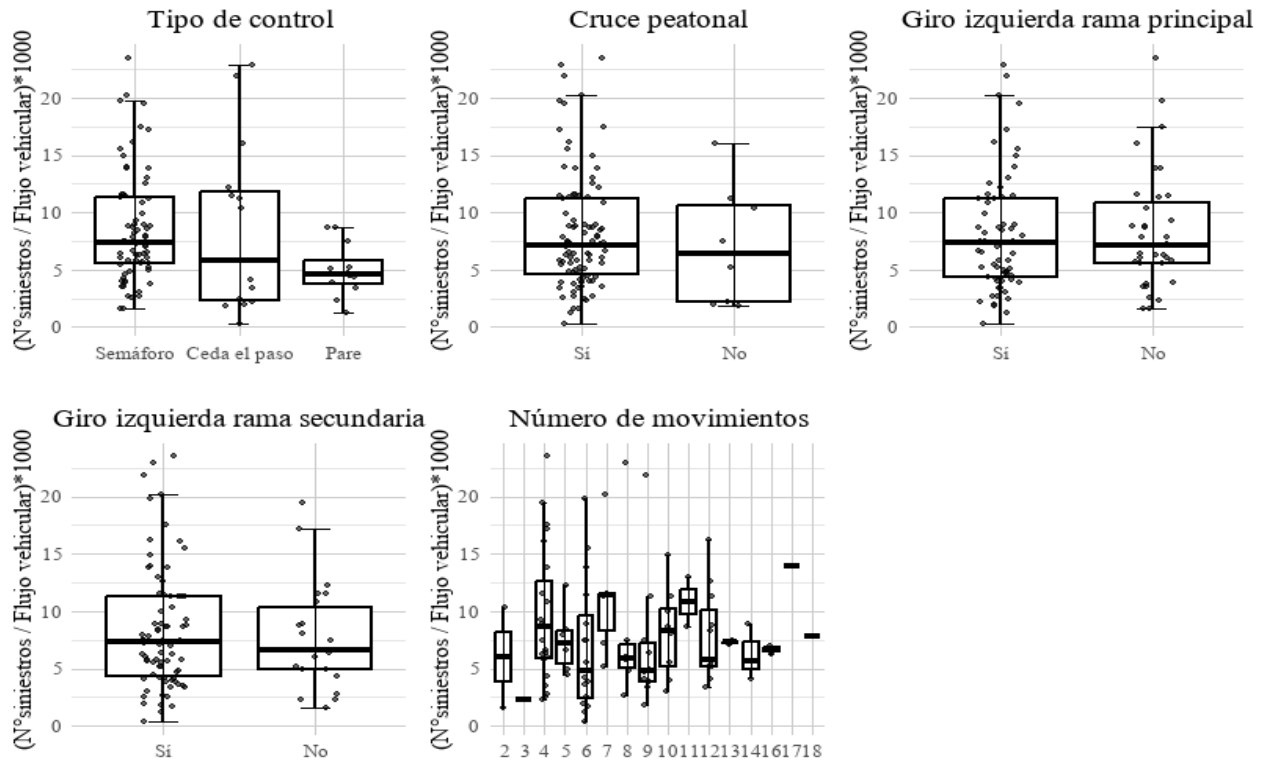




**Figura 4.5** Diagrama de cajas: variables de infraestructura.

El análisis de las variables operacionales, representadas en la Figura 4.6 permite identificar patrones relevantes en la relación entre las condiciones de control del tránsito y la frecuencia de siniestros de tránsito en intersecciones urbanas. En primer lugar, se evidencia que las intersecciones controladas por semáforo presentan una mayor frecuencia de siniestros en comparación con aquellas reguladas por señales de ceda el paso o pare. Esta tendencia puede atribuirse a que los semáforos suelen instalarse en intersecciones con altos volúmenes de tráfico y mayor complejidad operacional, donde el riesgo de siniestros ya es elevado, más que a un efecto directo del semáforo sobre la siniestralidad. Sin embargo, para establecer una relación causal sería necesario comparar la misma intersección antes y después de la instalación del semáforo, lo que permitiría aislar el efecto del control semafórico sobre la ocurrencia de siniestros (Retting et al., 2003)

En cuanto a los cruces peatonales, los resultados fueron inconsistentes, esto puede explicarse de la misma manera que la variable valla peatonal, es decir, la falta de datos de flujos peatonales. Por otro lado, la presencia de giros a la izquierda, tanto en ramas principales como secundarias, se asocia con un aumento en la frecuencia de siniestros, lo que concuerda con estudios previos que identifican estos movimientos como maniobras de alto riesgo debido a la complejidad de las trayectorias y la interacción con otros flujos vehiculares (Wang et al., 2006). Respecto al número de movimientos permitidos en la intersección, no se observa una relación lineal clara con la siniestralidad.



**Figura 4.6** Diagrama de cajas: variables de operación.

El análisis de las variables relacionadas con el entorno urbano, representadas en la Figura 4.7, permite identificar cómo distintos tipos de usos del suelo y elementos del entorno físico influyen en la frecuencia de siniestros de tránsito. En primer lugar, se evidencia que las zonas comerciales presentan una mayor frecuencia de siniestros en comparación con las zonas residenciales y mixtas, y dado que la cantidad de siniestros está normalizada por el flujo vehicular, este aumento no se explica por una mayor circulación de autos, sino que puede atribuirse a la complejidad e intensidad de la interacción entre peatones y vehículos, así como a situaciones de conflicto en la vía. Este hallazgo es consistente con estudios previos que señalan que los entornos comerciales suelen concentrar más puntos de riesgo debido a la interacción entre distintos modos de transporte y la alta densidad de personas (Ewing y Dumbaugh, 2009). Por otro lado, se observa que a medida que aumenta el número de paraderos en el entorno, también tiende a incrementarse la siniestralidad, ya que la presencia de paraderos favorece las detenciones de vehículos cerca de las intersecciones viales y el cruce de peatones, generando mayor exposición al riesgo.

En el caso de los números de centros de salud, se visualiza un aumento en la frecuencia de siniestros en intersecciones cercanas, lo que podría estar relacionado con la presencia de mayores vehículos de emergencia, que a menudo deben realizar maniobras rápidas o prioritarias, lo que puede aumentar la probabilidad de situaciones de conflictos. Por otro lado, respecto a los centros de educación y comercios, no se observa una relación lineal clara con la siniestralidad, lo que sugiere que otros factores contextuales o de diseño urbano podrían estar modulando su impacto.

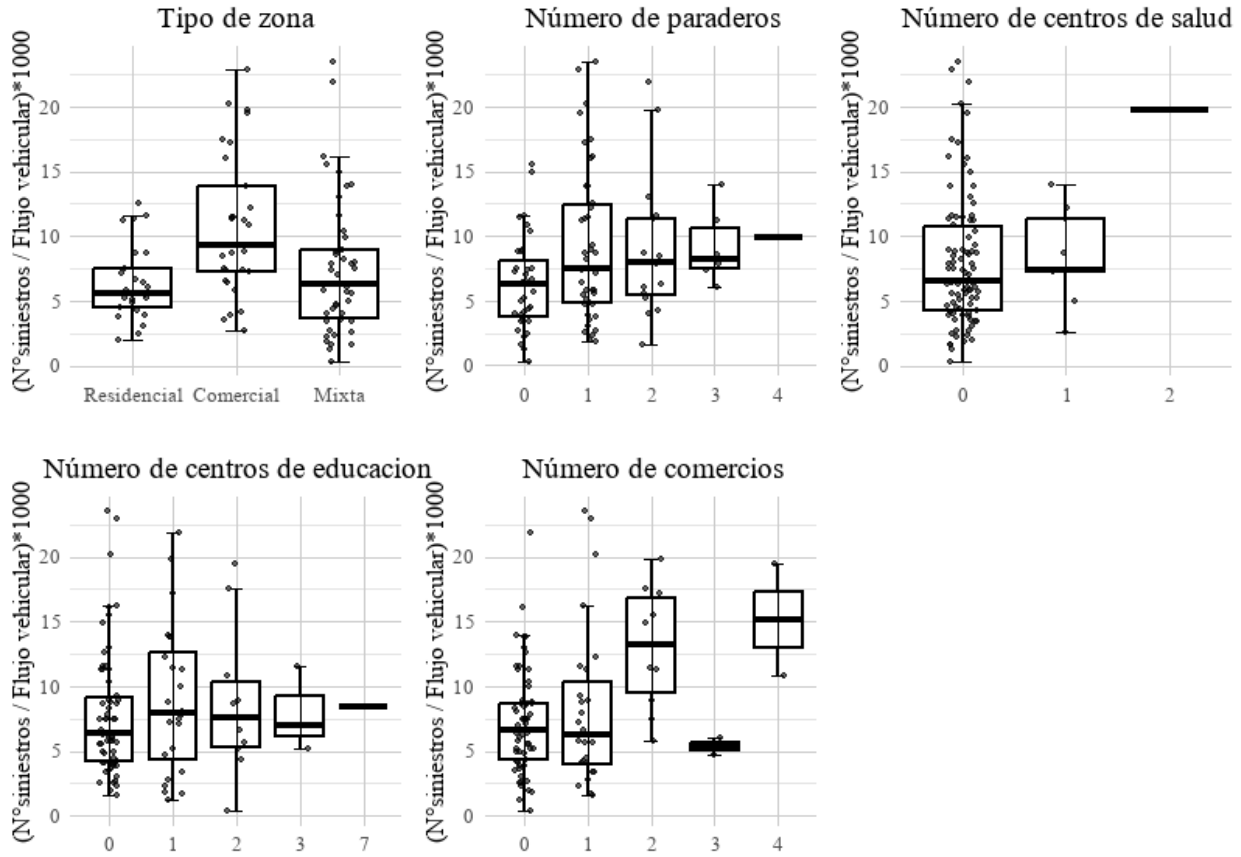


Figura 4.7 Diagrama de cajas: variables de entorno.

#### 4.4 Resultados del modelo Binomial Negativo

La fórmula del modelo correspondiente al conjunto 1, que considera los siniestros totales registrados durante cinco años (2019-2023), incorpora la totalidad de las variables y utiliza el flujo total de la intersección, se presenta en la *ecuación (4.1)*.

$$\log(S_i) = \beta_0 + \sum_{a=1}^k \alpha_a \cdot X_{i,a} + \sum_{b=1}^m \beta_b \cdot X_{i,b} + \sum_{c=1}^n \gamma_c \cdot X_{i,c} \quad (4.1)$$

Donde  $S_i$  corresponde al número esperado de siniestros totales en la intersección  $i$  para el periodo de cinco años (2019-2023). El parámetro  $\beta_0$  es el intercepto del modelo. Los coeficientes  $\alpha_a$ ,  $\beta_b$  y  $\gamma_c$  corresponden a los coeficientes de estimación entregados por el modelo para las variables de infraestructura, operación y entorno, respectivamente. Finalmente,  $X_{i,a}$ ,  $X_{i,b}$  y  $X_{i,c}$  son las variables independientes que se ingresan al modelo, para infraestructura, operación y entorno en la intersección  $i$ , respectivamente.

Los resultados del modelo se presentan en la Tabla 4.4, donde se incluyen los coeficientes estimados para cada variable, junto con sus respectivos errores estándar, valores Z y valores p, siendo este último el indicador que refleja la significancia estadística. Las métricas de desempeño asociadas al modelo se detallan en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.4** Resultados del modelo de regresión Binomial Negativo para el conjunto 1 (periodo 2019-2023).

| Variable                                           | Estimación | Error estándar | Valor Z | Valor p |     | Porcentaje (%) |
|----------------------------------------------------|------------|----------------|---------|---------|-----|----------------|
| Intercepto                                         | 0.94       | 0.3684         | 2.5515  | 0.0107  | *   | 155.99         |
| Tipo de zona: comercial                            | 0.3141     | 0.1798         | 1.7468  | 0.0807  | .   | 36.91          |
| Tipo de zona: mixta                                | 0.0042     | 0.1493         | 0.0279  | 0.9778  |     | 0.42           |
| Tipo de intersección: cruz                         | 0.5706     | 0.1641         | 3.476   | 0.0005  | *** | 76.93          |
| Tipo de intersección: Y                            | 0.4936     | 0.2652         | 1.8613  | 0.0627  | .   | 63.81          |
| Mediana rama principal: parcialmente con mediana   | -0.1611    | 0.4105         | -0.3926 | 0.6946  |     | -14.88         |
| Mediana rama principal: completamente con mediana  | 0.2601     | 0.187          | 1.391   | 0.1642  |     | 29.71          |
| Mediana rama secundaria: parcialmente con mediana  | -0.6445    | 0.2891         | -2.2293 | 0.0258  | *   | -47.51         |
| Mediana rama secundaria: completamente con mediana | 0.0045     | 0.2254         | 0.0198  | 0.9842  |     | 0.45           |
| Tipo de control: ceda el paso                      | -0.0528    | 0.1795         | -0.2939 | 0.7688  |     | -5.14          |
| Tipo de control: pare                              | -0.4295    | 0.2088         | -2.0566 | 0.0397  | *   | -34.91         |
| Pista exclusiva giro izquierda rama principal: Sí  | -0.2557    | 0.1754         | -1.4572 | 0.1451  |     | -22.56         |
| Pista exclusiva giro derecha rama principal: Sí    | -0.3724    | 0.1529         | -2.4359 | 0.0149  | *   | -31.09         |
| Pista exclusiva giro izquierda rama secundaria: Sí | 0.2255     | 0.1763         | 1.2794  | 0.2008  |     | 25.3           |
| Pista exclusiva giro derecha rama secundaria: Sí   | 0.111      | 0.1567         | 0.7088  | 0.4784  |     | 11.74          |
| Giro izquierda en rama principal: Sí               | 0.143      | 0.1437         | 0.9952  | 0.3197  |     | 15.37          |
| Giro izquierda en rama secundaria: Sí              | 0.1997     | 0.1572         | 1.2706  | 0.2039  |     | 22.1           |
| N° de paraderos                                    | 0.1435     | 0.0623         | 2.3038  | 0.0212  | *   | 15.44          |

| Variable                                                                                 | Estimación | Error estándar | Valor Z | Valor p |     | Porcentaje (%) |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------|---------|---------|-----|----------------|
| N° de centros de salud                                                                   | 0.0743     | 0.1568         | 0.4736  | 0.6358  |     | 7.71           |
| N° de centros de educación                                                               | -0.0278    | 0.0503         | -0.5534 | 0.58    |     | -2.75          |
| N° de comercios                                                                          | 0.0156     | 0.0634         | 0.2454  | 0.8061  |     | 1.57           |
| N° de ramas de accesos                                                                   | -0.0258    | 0.135          | -0.1913 | 0.8483  |     | -2.55          |
| N° de pistas de la rama principal                                                        | 0.126      | 0.0582         | 2.1632  | 0.0305  | *   | 13.43          |
| N° de pistas de la rama secundaria                                                       | 0.0282     | 0.0862         | 0.327   | 0.7437  |     | 2.86           |
| N° de movimientos                                                                        | -0.0396    | 0.0338         | -1.1727 | 0.2409  |     | -3.89          |
| Flujo de la intersección                                                                 | 0.0003     | 0.0001         | 4.3295  | 0.00001 | *** | 0.03           |
| Significancia: *** $p \leq 0.001$ ; ** $p \leq 0.01$ ; * $p \leq 0.05$ ; . $p \leq 0.12$ |            |                |         |         |     |                |

**Tabla 4.5** Métricas de desempeño del modelo de regresión Binomial Negativo para el conjunto 1 (periodo 2019-2023).

| RMSE    | MAE    | AIC      | McFadden's R <sup>2</sup> |
|---------|--------|----------|---------------------------|
| 10.0289 | 6.9854 | 735.6809 | 0.1352                    |

Para facilitar la interpretación de los resultados del conjunto 1, se presenta una nueva estimación del modelo donde la cantidad de siniestros ha sido normalizada a un año, utilizando el promedio anual de los registros correspondientes al periodo 2019–2023. De este modo, es posible analizar el efecto de las variables explicativas en un año promedio. La fórmula de este modelo se detalla en la *ecuación (4.2)*, la cual difiere de la *ecuación (4.1)* únicamente en el uso de  $\bar{S}_i$  para representar el promedio anual, conservando el significado de los demás términos. Los resultados obtenidos del modelo se presentan en la Tabla 4.6.

$$\log(\bar{S}_i) = \beta_0 + \sum_{a=1}^k \alpha_a \cdot X_{i,a} + \sum_{b=1}^m \beta_b \cdot X_{i,b} + \sum_{c=1}^n \gamma_c \cdot X_{i,c} \quad (4.2)$$

**Tabla 4.6** Resultados del modelo con siniestros normalizados a un año para el conjunto 1.

| Variable   | Estimación | Error estándar | Valor Z | Valor p |   | Porcentaje (%) |
|------------|------------|----------------|---------|---------|---|----------------|
| Intercepto | -0.6767    | 0.4018         | -1.6843 | 0.0921  | . | -49.17         |

| Variable                                           | Estimación | Error estándar | Valor Z | Valor p |    | Porcentaje (%) |
|----------------------------------------------------|------------|----------------|---------|---------|----|----------------|
| Tipo de zona: comercial                            | 0.3714     | 0.1971         | 1.8838  | 0.0596  | .  | 44.97          |
| Tipo de zona: mixta                                | 0.0606     | 0.1697         | 0.3572  | 0.7209  |    | 6.25           |
| Tipo de intersección: cruz                         | 0.5198     | 0.1784         | 2.9131  | 0.0036  | ** | 68.17          |
| Tipo de intersección: Y                            | 0.4299     | 0.2764         | 1.5554  | 0.1198  | .  | 53.7           |
| Mediana rama principal: parcialmente con mediana   | -0.352     | 0.6318         | -0.5571 | 0.5774  |    | -29.67         |
| Mediana rama principal: completamente con mediana  | 0.3473     | 0.2186         | 1.5885  | 0.1122  | .  | 41.52          |
| Mediana rama secundaria: parcialmente con mediana  | -0.4998    | 0.3109         | -1.6076 | 0.1079  | .  | -39.34         |
| Mediana rama secundaria: completamente con mediana | 0.0158     | 0.2484         | 0.0636  | 0.9493  |    | 1.59           |
| Tipo de control: ceda el paso                      | 0.1016     | 0.1934         | 0.5254  | 0.5993  |    | 10.7           |
| Tipo de control: pare                              | -0.4514    | 0.2811         | -1.6058 | 0.1083  | .  | -36.33         |
| Pista exclusiva giro izquierda rama principal: Sí  | -0.2463    | 0.1936         | -1.2721 | 0.2033  |    | -21.83         |
| Pista exclusiva giro derecha rama principal: Sí    | -0.2718    | 0.1687         | -1.6113 | 0.1071  | .  | -23.8          |
| Pista exclusiva giro izquierda rama secundaria: Sí | 0.1466     | 0.182          | 0.8052  | 0.4207  |    | 15.79          |
| Pista exclusiva giro derecha rama secundaria: Sí   | 0.0437     | 0.1718         | 0.2542  | 0.7993  |    | 4.46           |
| Giro izquierda en rama principal: Sí               | 0.1808     | 0.156          | 1.159   | 0.2465  |    | 19.82          |
| Giro izquierda en rama secundaria: Sí              | 0.1818     | 0.1771         | 1.0266  | 0.3046  |    | 19.94          |
| N° de paraderos                                    | 0.132      | 0.0654         | 2.0185  | 0.0435  | *  | 14.11          |
| N° de centros de salud                             | 0.1306     | 0.1496         | 0.8733  | 0.3825  |    | 13.95          |
| N° de centros de educación                         | -0.0243    | 0.0538         | -0.4515 | 0.6516  |    | -2.4           |
| N° de comercios                                    | -0.0222    | 0.0703         | -0.3155 | 0.7524  |    | -2.19          |
| N° de ramas de accesos                             | 0.0132     | 0.1449         | 0.091   | 0.9275  |    | 1.33           |
| N° de pistas de la rama principal                  | 0.1168     | 0.0652         | 1.7914  | 0.0732  | .  | 12.39          |

| Variable                                                                                 | Estimación | Error estándar | Valor Z | Valor p |     | Porcentaje (%) |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------|---------|---------|-----|----------------|
| N° de pistas de la rama secundaria                                                       | 0.0161     | 0.0982         | 0.1642  | 0.8696  |     | 1.63           |
| N° de movimientos                                                                        | -0.0459    | 0.0356         | -1.2885 | 0.1976  |     | -4.49          |
| Flujo de la intersección                                                                 | 0.0003     | 0.0001         | 3.813   | 0.0001  | *** | 0.03           |
| Significancia: *** $p \leq 0.001$ ; ** $p \leq 0.01$ ; * $p \leq 0.05$ ; . $p \leq 0.12$ |            |                |         |         |     |                |

A continuación, se presenta la interpretación de las variables significativas ( $p \leq 0.05$ ) del conjunto 1.

- Las intersecciones tipo "Cruz" presenta en promedio anual, un 68.17 % más de siniestros de tránsito que las intersecciones tipo T.
- Cada paradero adicional cercano a 50 metros de la intersección se asocia con un aumento promedio anual del 14.11 % en los siniestros de tránsito.
- Cada 100 unidades adicionales de flujo vehicular (veq/h) se asocia con un aumento promedio anual del 3 % en los siniestros de tránsito.

Se identificaron variables con significancia moderada ( $p \leq 0.12$ ) del conjunto 1. A continuación, se detallan junto con su interpretación.

- Las intersecciones tipo "Y" presenta en promedio anual, un 53.7 % más de siniestros de tránsito que las intersecciones tipo T.
- La zona comercial presenta en promedio anual, un 44.97 % más de siniestros de tránsito que una zona residencial.
- La presencia total de mediana en la rama principal presenta en promedio anual, un aumento de 41.52 % de siniestros de tránsito, en comparación con intersecciones donde no existe mediana en dicha rama.
- La presencia parcial de mediana en la rama secundaria presenta en promedio anual, una reducción de 39.34 % de siniestros de tránsito, en comparación con intersecciones donde no existe mediana en dicha rama.
- El tipo de control "Pare" presenta en promedio anual, un 36.33% menos de siniestros de tránsito que las intersecciones que presentan el tipo de control "Semáforo".
- La presencia de una pista exclusiva de giro a la derecha en la rama principal se asocia con un promedio anual de 23.8 % menos de siniestros de tránsito, en comparación con intersecciones que no la tienen.

- Cada pista adicional en la rama principal se asocia con un aumento promedio anual del 12.39 % en los siniestros de tránsito.

A continuación, se presenta la fórmula del modelo correspondiente al conjunto 2 en la *ecuación (4.3)*. Esta mantiene la misma estructura que la presentada para el conjunto 1, incorporando las mismas variables explicativas y coeficientes. Sin embargo, en este caso se añade un término *offset*, representado por  $\log(Flujo_i)$  el cual permite ajustar el modelo en función del flujo vehicular registrado en cada intersección  $i$ .

$$\log(S_i) = \beta_0 + \sum_{a=1}^k \alpha_a \cdot X_{i,a} + \sum_{b=1}^m \beta_b \cdot X_{i,b} + \sum_{c=1}^n \gamma_c \cdot X_{i,c} + \log(Flujo_i) \quad (4.3)$$

Los resultados del modelo se presentan en la Tabla 4.7, donde se incluyen los coeficientes estimados para cada variable, junto con sus respectivos errores estándar, valores Z y valores p, siendo este último el indicador que refleja la significancia estadística. Las métricas de desempeño asociadas al modelo se detallan en la Tabla 4.8.

**Tabla 4.7** Resultados del modelo de regresión Binomial Negativo para el conjunto 2 (periodo 2019-2023).

| Variable                                           | Estimación | Error estándar | Valor Z  | Valor p |     | Porcentaje (%) |
|----------------------------------------------------|------------|----------------|----------|---------|-----|----------------|
| Intercepto                                         | -6.0215    | 0.3616         | -16.6527 | 0       | *** | -99.76         |
| Tipo de zona: comercial                            | 0.1437     | 0.1883         | 0.7634   | 0.4452  |     | 15.46          |
| Tipo de zona: mixta                                | -0.222     | 0.1531         | -1.4504  | 0.147   |     | -19.91         |
| Tipo de intersección: cruz                         | 0.5619     | 0.1686         | 3.3333   | 0.0009  | *** | 75.4           |
| Tipo de intersección: Y                            | 0.5523     | 0.2742         | 2.0146   | 0.044   | *   | 73.73          |
| Mediana rama principal: parcialmente con mediana   | 0.0304     | 0.424          | 0.0716   | 0.9429  |     | 3.08           |
| Mediana rama principal: completamente con mediana  | -0.0451    | 0.1817         | -0.2483  | 0.8039  |     | -4.41          |
| Mediana rama secundaria: parcialmente con mediana  | -0.6547    | 0.3056         | -2.1425  | 0.0322  | *   | -48.04         |
| Mediana rama secundaria: completamente con mediana | -0.0941    | 0.2315         | -0.4064  | 0.6844  |     | -8.98          |
| Tipo de control: ceda el paso                      | 0.0379     | 0.1849         | 0.2051   | 0.8375  |     | 3.87           |
| Tipo de control: pare                              | -0.2594    | 0.2065         | -1.2561  | 0.2091  |     | -22.85         |

| Variable                                                                                 | Estimación | Error estándar | Valor Z | Valor p |   | Porcentaje (%) |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------|---------|---------|---|----------------|
| Pista exclusiva giro izquierda rama principal: Sí                                        | -0.2616    | 0.1761         | -1.4858 | 0.1373  |   | -23.02         |
| Pista exclusiva giro derecha rama principal: Sí                                          | -0.3855    | 0.158          | -2.4404 | 0.0147  | * | -31.99         |
| Pista exclusiva giro izquierda rama secundaria: Sí                                       | 0.1863     | 0.1822         | 1.0223  | 0.3067  |   | 20.47          |
| Pista exclusiva giro derecha rama secundaria: Sí                                         | 0.0651     | 0.1637         | 0.3976  | 0.6909  |   | 6.72           |
| Giro izquierda en rama principal: Sí                                                     | 0.237      | 0.1486         | 1.5947  | 0.1108  | . | 26.75          |
| Giro izquierda en rama secundaria: Sí                                                    | 0.3189     | 0.16           | 1.9933  | 0.0462  | * | 37.56          |
| N° de paraderos                                                                          | 0.1579     | 0.0626         | 2.5213  | 0.0117  | * | 17.11          |
| N° de centros de salud                                                                   | -0.0292    | 0.1581         | -0.1848 | 0.8534  |   | -2.88          |
| N° de centros de educación                                                               | -0.018     | 0.0517         | -0.3485 | 0.7275  |   | -1.79          |
| N° de comercios                                                                          | 0.1009     | 0.0647         | 1.5594  | 0.1189  | . | 10.62          |
| N° de ramas de accesos                                                                   | -0.0091    | 0.1394         | -0.0652 | 0.948   |   | -0.9           |
| N° de pistas de la rama principal                                                        | 0.1046     | 0.0557         | 1.8794  | 0.0602  | . | 11.03          |
| N° de pistas de la rama secundaria                                                       | 0.0718     | 0.0891         | 0.8055  | 0.4205  |   | 7.44           |
| N° de movimientos                                                                        | -0.0377    | 0.035          | -1.0755 | 0.2821  |   | -3.7           |
| Significancia: *** $p \leq 0.001$ ; ** $p \leq 0.01$ ; * $p \leq 0.05$ ; . $p \leq 0.12$ |            |                |         |         |   |                |

**Tabla 4.8** Métricas de desempeño del modelo de regresión Binomial Negativo para el conjunto 2 (periodo 2019-2023).

| RMSE    | MAE    | AIC      | McFadden's R <sup>2</sup> |
|---------|--------|----------|---------------------------|
| 10.5425 | 7.3258 | 739.0272 | 0.1285                    |

Para facilitar la interpretación de los resultados del conjunto 2, se presenta una nueva estimación del modelo donde la cantidad de siniestros ha sido normalizada a un año, utilizando el promedio anual de los registros correspondientes al periodo 2019–2023. De este modo, es posible analizar el efecto de las variables explicativas en un año promedio. La fórmula de este modelo se detalla en la *ecuación (4.4)*, la cual difiere de la *ecuación (4.3)* únicamente en el uso de  $\bar{S}_i$  para representar el promedio anual, conservando el significado de los demás términos. Los resultados obtenidos del modelo se presentan en la Tabla 4.9.

$$\log(\bar{S}_i) = \beta_0 + \sum_{a=1}^k \alpha_a \cdot X_{i,a} + \sum_{b=1}^m \beta_b \cdot X_{i,b} + \sum_{c=1}^n \gamma_c \cdot X_{i,c} + \log(\text{Flujo}_i) \quad (4.4)$$

**Tabla 4.9** Resultados del modelo con siniestros normalizados a un año para el conjunto 2.

| Variable                                           | Estimación | Error estándar | Valor Z  | Valor p |     | Porcentaje (%) |
|----------------------------------------------------|------------|----------------|----------|---------|-----|----------------|
| Intercepto                                         | -7.7793    | 0.38029        | -20.4565 | 0       | *** | -99.96         |
| Tipo de zona: comercial                            | 0.29584    | 0.19784        | 1.4954   | 0.13482 |     | 34.43          |
| Tipo de zona: mixta                                | -0.11006   | 0.17019        | -0.6467  | 0.51784 |     | -10.42         |
| Tipo de intersección: cruz                         | 0.50333    | 0.17711        | 2.842    | 0.00448 | **  | 65.42          |
| Tipo de intersección: Y                            | 0.48531    | 0.27823        | 1.7443   | 0.08111 | .   | 62.47          |
| Mediana rama principal: parcialmente con mediana   | -0.13594   | 0.63806        | -0.213   | 0.83129 |     | -12.71         |
| Mediana rama principal: completamente con mediana  | 0.02402    | 0.20358        | 0.118    | 0.90606 |     | 2.43           |
| Mediana rama secundaria: parcialmente con mediana  | -0.53977   | 0.31688        | -1.7034  | 0.08849 | .   | -41.71         |
| Mediana rama secundaria: completamente con mediana | -0.08572   | 0.249          | -0.3443  | 0.73064 |     | -8.22          |
| Tipo de control: ceda el paso                      | 0.18151    | 0.19442        | 0.9336   | 0.35053 |     | 19.9           |
| Tipo de control: pare                              | -0.2431    | 0.27154        | -0.8952  | 0.37066 |     | -21.58         |
| Pista exclusiva giro izquierda rama principal: Sí  | -0.20851   | 0.18564        | -1.1232  | 0.26135 |     | -18.82         |
| Pista exclusiva giro derecha rama principal: Sí    | -0.26792   | 0.16982        | -1.5777  | 0.11464 | .   | -23.5          |
| Pista exclusiva giro izquierda rama secundaria: Sí | 0.12829    | 0.18042        | 0.7111   | 0.47702 |     | 13.69          |
| Pista exclusiva giro derecha rama secundaria: Sí   | 0.02208    | 0.17273        | 0.1279   | 0.89826 |     | 2.23           |
| Giro izquierda en rama principal: Sí               | 0.25234    | 0.15582        | 1.6194   | 0.10536 | .   | 28.7           |
| Giro izquierda en rama secundaria: Sí              | 0.27577    | 0.17719        | 1.5564   | 0.11962 | .   | 31.75          |
| N° de paraderos                                    | 0.15686    | 0.06293        | 2.4928   | 0.01268 | *   | 16.98          |
| N° de centros de salud                             | 0.03171    | 0.14553        | 0.2179   | 0.82754 |     | 3.22           |

| Variable                                                                                 | Estimación | Error estándar | Valor Z | Valor p |  | Porcentaje (%) |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------|---------|---------|--|----------------|
| N° de centros de educación                                                               | -0.02388   | 0.05294        | -0.451  | 0.65201 |  | -2.36          |
| N° de comercios                                                                          | 0.04688    | 0.07025        | 0.6674  | 0.5045  |  | 4.8            |
| N° de ramas de accesos                                                                   | 0.06124    | 0.14484        | 0.4228  | 0.67243 |  | 6.32           |
| N° de pistas de la rama principal                                                        | 0.07818    | 0.05978        | 1.3078  | 0.19094 |  | 8.13           |
| N° de pistas de la rama secundaria                                                       | 0.05799    | 0.1001         | 0.5793  | 0.5624  |  | 5.97           |
| N° de movimientos                                                                        | -0.04215   | 0.03594        | -1.1729 | 0.24085 |  | -4.13          |
| Significancia: *** $p \leq 0.001$ ; ** $p \leq 0.01$ ; * $p \leq 0.05$ ; . $p \leq 0.12$ |            |                |         |         |  |                |

A continuación, se presenta la interpretación de las variables significativas ( $p \leq 0.05$ ) del conjunto 2.

- Las intersecciones tipo "Cruz" presenta en promedio anual, un 65.42 % más de siniestros de tránsito que las intersecciones tipo T, si se mantiene constante el flujo vehicular.
- Cada paradero adicional cercano a 50 metros de la intersección se asocia con un aumento promedio anual del 16.98 % en los siniestros de tránsito, si se mantiene constante el flujo vehicular.

Se identificaron variables con significancia moderada ( $p \leq 0.12$ ) del conjunto 2. A continuación, se detallan junto con su interpretación.

- Las intersecciones tipo "Y" presenta en promedio anual, un 62.47 % más de siniestros de tránsito que las intersecciones tipo T, si se mantiene constante el flujo vehicular.
- La presencia parcial de mediana en la rama secundaria presenta en promedio anual, una reducción de 41.71 % de siniestros de tránsito, en comparación con intersecciones donde no existe mediana en dicha rama, si se mantiene constante el flujo vehicular.
- Las intersecciones que permiten giros a la izquierda se asocian con un aumento promedio anual en los siniestros de tránsito del 31.75 % en la rama secundaria y del 28.7 % en la rama principal, en comparación con aquellas en las que esta maniobra está prohibida, si se mantiene constante el flujo vehicular.
- La presencia de una pista exclusiva de giro a la derecha en la rama principal se asocia con un promedio anual de 23.5 % menos de siniestros de tránsito, en comparación con intersecciones que no la tienen, si se mantiene constante el flujo vehicular.

Por otro lado, los resultados de los conjuntos 3, 4 y 5 se presentan en el Anexo A. En el conjunto 3, las variables significativas se mantienen constantes, tanto al considerar el flujo total de la intersección como al analizar por separado los flujos de las ramas principal y secundaria. En el conjunto 4, las variables significativas tampoco varían al utilizar el mayor número de pistas o el promedio. En el conjunto 5, al reclasificar la categoría "parcialmente con mediana" como "presencia de mediana", la variable "presencia de giro a la izquierda en la rama secundaria" deja de ser significativa. Estos hallazgos reflejan una consistencia general en la identificación de factores significativos bajo diferentes enfoques de modelación.

Al comparar las métricas de desempeño entre los modelos evaluados, se obtienen los siguientes resultados. El conjunto 1 presenta el valor de AIC más bajo, lo que indica un adecuado equilibrio entre la calidad del ajuste y la complejidad del modelo. El conjunto 2, por su parte, exhibe un valor de AIC muy similar, lo que indica un rendimiento comparable. Ambos conjuntos muestran los valores más bajos de RMSE y MAE lo que respalda su capacidad para ajustarse adecuadamente a los datos observados y minimizar los errores de predicción. En cuanto a la capacidad explicativa, el conjunto 2 alcanza el mayor valor de McFadden's  $R^2$ , aunque la diferencia respecto a el conjunto 1 es marginal, lo que implica que ambos modelos explican una proporción similar de la variabilidad observada en los siniestros. Considerando el desempeño prácticamente equivalente de los conjuntos 1 y 2, y el hecho de que en el análisis exploratorio se aplicó la normalización del flujo, se selecciona el conjunto 2 como el conjunto de variables, priorizando la coherencia metodológica y la consistencia de los resultados.

El modelo seleccionado presenta una adecuada correspondencia entre los siniestros observados y los predichos, lo que respalda la validez del modelo, la comparación se detalla en el Anexo B. Las métricas de desempeño indican lo siguiente:

- El valor de RMSE de 10.06 indica que, en promedio, la diferencia entre los siniestros predichos por el modelo y los observados en cada intersección es aproximadamente 10, dando mayor peso a los errores de mayor magnitud en el cálculo.
- El valor de MAE de 6.92 señala que, en promedio, el modelo presenta un error absoluto cercano a 7 siniestros por intersección, sin importar si la predicción sobreestima o subestima el valor real.
- El valor de McFadden's  $R^2$  de 0.1363 indica que el modelo es capaz de explicar aproximadamente el 13% de la variabilidad observada en los siniestros de tránsito, lo cual es un resultado bajo pero habitual y aceptable en estudios de este tipo, dada la complejidad y aleatoriedad inherente al fenómeno analizado (Louviere et al., 2000).

Para facilitar la visualización de los coeficientes estimados por el modelo para los conjuntos 1 y 2, se incluyen gráficos en el Anexo C que muestran el efecto porcentual de todas las variables, así como de aquellas que resultaron significativas, tanto para el total de siniestros como para los resultados normalizados a un año.

#### 4.5 Propuestas de estrategias de intervención para reducir la siniestralidad vial

Según los resultados obtenidos con el modelo Binomial Negativo seleccionado, se identificaron siete variables significativamente asociadas a la ocurrencia de siniestros de tránsito durante el periodo 2019–2023. El análisis y las propuestas de intervención se enfocan prioritariamente en estos factores, los cuales se detallan a continuación:

- Las intersecciones tipo “Y” registran una mayor frecuencia de siniestros de tránsito comparado con las intersecciones tipo “T”, debido principalmente a su configuración geométrica que genera problemas de visibilidad y ángulos de giro agudos. Estas condiciones dificultan la percepción de vehículos conflictivos y reducen el tiempo de reacción para evitar colisiones. Por ello, en base a los resultados de la modelación se propondría como potencial medida para reducir los siniestros de tránsito intervenir estos cruces mejorando la visibilidad, modificar los ángulos de acceso y reforzar la señalización horizontal y vertical. Sin embargo, es importante señalar que esta categoría representa solo 5 casos dentro del total analizado, lo que limita la robustez del hallazgo y la posibilidad de generalizar este resultado a otras situaciones. Por lo tanto, se recomienda interpretar este resultado con cautela y validarlo en futuros estudios con una mayor cantidad de intersecciones tipo “Y”.
- Las intersecciones tipo “Cruz” también se asocian a un mayor número de siniestros comparado con las intersecciones tipo “T”. Este diseño geométrico es el más predominante en la ciudad, representando 72 de las 100 intersecciones analizadas. Sin embargo, debido a su alta presencia y a la heterogeneidad de contextos urbanos en los que se encuentran, resulta difícil proponer una medida de intervención única o generalizable. En consecuencia, se recomienda realizar un análisis específico para cada intersección de este tipo.
- La presencia parcial de medianas se asocia a una disminución en la ocurrencia de siniestros de tránsito. Este efecto positivo no solo se debe a la separación física de los flujos opuestos, sino también a que su presencia suele indicar un diseño vial más seguro. Generalmente, las vías que cuentan con mediana corresponden a ejes de mayor jerarquía que presentan un perfil más amplio, lo que mejora la visibilidad en los cruces y facilita el contacto visual entre los flujos vehiculares en conflicto. Por lo tanto, se recomienda evaluar la implementación de medianas en aquellas intersecciones problemáticas que actualmente no disponen de este elemento. Sin embargo, es importante señalar que, solo se identificaron 7 casos de intersecciones con mediana parcial en el total analizado, lo que limita la robustez y generalización de este resultado. Por ello, se sugiere interpretar este hallazgo con cautela y validarlo en futuros estudios con una mayor cantidad de casos.
- Una mayor cantidad de paraderos ubicados en un radio de 50 metros respecto a la intersección se asocia a un incremento en la siniestralidad vial. Por lo tanto, se recomendaría retirar aquellos paraderos que se encuentren demasiado próximos a intersecciones o en sectores identificados como de alta conflictividad. Asimismo, es fundamental mejorar la infraestructura destinada al ascenso y descenso seguro de pasajeros, e implementar zonas de detención exclusivas para buses, debidamente separadas del flujo vehicular principal, con el objetivo de reducir interferencias y riesgos para todos los usuarios de la vía.

- La existencia de pistas exclusivas para giros a la derecha en la rama principal se asocia a una reducción de siniestros. Por lo tanto, se recomendaría mantener y ampliar la implementación de estas pistas en intersecciones conflictivas, asegurando una señalización clara y el cumplimiento efectivo de su uso exclusivo. En aquellos casos donde la geometría vial lo requiera, se sugiere considerar el ensanche de la calzada para habilitar adecuadamente estas pistas, garantizando así un flujo vehicular más seguro y ordenado
- La posibilidad de realizar giros a la izquierda en las ramas principales se asocia a un aumento en el riesgo de siniestros de tránsito. Por ello, se recomendaría restringir o prohibir estos giros en aquellos puntos identificados como críticos. En los casos donde no sea factible su eliminación, se sugiere implementar fases semafóricas exclusivas para giros a la izquierda, con el fin de separar estos movimientos del resto del flujo vehicular. Asimismo, es fundamental reforzar la señalización y las advertencias específicas para estos giros, de modo que los conductores estén debidamente informados y alertados sobre la maniobra.
- De manera similar, la posibilidad de realizar giros a la izquierda en las ramas secundarias también se asocia a un mayor riesgo de siniestros. Por lo tanto, se recomienda aplicar las mismas medidas sugeridas para las ramas principales, priorizando la restricción o prohibición de estos giros en puntos críticos, o bien la implementación de fases semafóricas exclusivas y una señalización adecuada.

Para una futura implementación de estas medidas, se recomienda utilizar la base de datos creada para Temuco y enfocar las intervenciones en aquellas intersecciones clasificadas como de alta siniestralidad, es decir, aquellas que registraron más de 26 siniestros en los últimos cinco años.

Además de las intervenciones específicas propuestas para las variables, es fundamental destacar la importancia de mantener e intensificar la fiscalización automatizada en la ciudad. Este tipo de sistemas permite a las municipalidades monitorear el tránsito en tiempo real, identificar patrones de riesgo y actuar de manera oportuna, constituyéndose en una solución práctica y eficiente para contribuir al ordenamiento del espacio público y la prevención de siniestros de tránsito. Esta recomendación se respalda en la información obtenida durante la reunión realizada en la oficina de CONASET en Temuco, donde se discutieron los resultados del Estudio de Comportamiento Vial llevado a cabo en 2024. Dicho estudio implementó un sistema automatizado de fiscalización y monitoreo en la intersección de Av. Caupolicán y Av. San Martín durante el mes de septiembre, registrando el paso de más de 205 mil vehículos y detectando un 20% de infracciones, principalmente por exceso de velocidad (21.578 casos), no uso de cinturón de seguridad (16.833) y uso de teléfono móvil (1.763). El informe evidencia una alta incidencia de conductas riesgosas, registrándose velocidades máximas de hasta 105 km/h y 254 vehículos que superaron los 80 km/h. Estos resultados subrayan la necesidad de fortalecer los mecanismos de fiscalización, con el fin de monitorear y sancionar adecuadamente este tipo de infracciones, y de esta manera prevenir futuros siniestros de tránsito.

De manera complementaria, expertos y entidades dedicadas a la seguridad vial recomiendan desarrollar campañas de concientización sobre los riesgos asociados a las maniobras peligrosas y la importancia de respetar la señalización. Si bien CONASET desarrolla este tipo de iniciativas en Chile, sería altamente beneficioso que otras instituciones, tanto públicas como privadas, se sumaran a estos esfuerzos, fortaleciendo así la cultura de seguridad vial en la comunidad.

# **CAPÍTULO 5**

## **CONCLUSIONES**

## Capítulo 5. Conclusiones

El presente estudio permitió analizar en profundidad la relación entre las características del entorno urbano y la ocurrencia de siniestros de tránsito en la ciudad de Temuco, generando evidencia local relevante para la gestión de la seguridad vial. A partir de un enfoque metodológico basado en análisis espacial, se crearon mapas de calor, de cuadrículas y de puntos con su respectiva clasificación de intersecciones según su nivel de riesgo. Estas herramientas permitieron identificar zonas críticas de alta siniestralidad, concentradas principalmente en el centro de la ciudad y en intersecciones con alto flujo vehicular. La representación espacial obtenida facilita visualizar con precisión las áreas más afectadas, lo que a su vez permite priorizar intervenciones orientadas a mejorar la seguridad vial.

Los resultados del modelo estadístico Binomial Negativo evidenciaron que variables de infraestructura, operación y entorno influyen significativamente en la frecuencia de siniestros de tránsito. Las intersecciones tipo “Cruz” y tipo “Y” presentan un mayor riesgo de siniestralidad en comparación con las de tipo ‘T’, mientras que la presencia parcial de medianas en ramas secundarias y la existencia de pistas exclusivas para giros a la derecha contribuyen a disminuir la ocurrencia de estos eventos. Por otro lado, un mayor número de paraderos cercanos a la intersección y la posibilidad de realizar giros a la izquierda en ramas principales y secundarias se asocian con un aumento en la ocurrencia de siniestros de tránsito. Estos resultados obtenidos por el modelo son pertinentes y coherentes, ya que coinciden con lo señalado en literatura. Estos hallazgos refuerzan la importancia de considerar el diseño geométrico y la operación de las intersecciones, así como la gestión del entorno, para reducir la exposición al riesgo y mejorar la seguridad vial.

El estudio propuso una metodología integral para agrupar y analizar siniestros de tránsito en intersecciones, lo que permitió identificar patrones espaciales con mayor precisión y establecer criterios objetivos para clasificar los puntos según su nivel de riesgo. Hasta donde alcanza el conocimiento del autor, este trabajo ha generado la primera base de datos estructurada y georreferenciada de siniestros de tránsito a nivel de intersección para la ciudad de Temuco, lo que constituye un aporte relevante tanto en la generación de información como en el desarrollo metodológico. Además, se considera que este trabajo representa el primer intento de modelar la ocurrencia de siniestros de tránsito en Temuco mediante la integración de herramientas de análisis espacial y modelación estadística avanzada. La metodología desarrollada no solo facilitó la identificación de zonas críticas y factores asociados al riesgo, sino que también sienta las bases para ampliar en el futuro el número de intersecciones analizadas, incrementando así la cobertura espacial y la representatividad de los resultados. Este enfoque flexible y replicable puede ser adaptado a otros entornos urbanos, lo que facilita la comparación y el desarrollo de estrategias de gestión de la seguridad vial basadas en evidencia.

El trabajo tuvo limitaciones importantes que deben ser consideradas al interpretar los resultados. Una de las principales restricciones es la cantidad y tipo de variables incluidas en la base de datos. Por motivos de tiempo y disponibilidad de información, no fue posible incorporar variables humanas, como el comportamiento de los conductores, la edad, el consumo de alcohol o drogas, y el uso de dispositivos móviles, factores que la literatura internacional reconoce como determinantes en la ocurrencia de siniestros. Asimismo, variables operacionales clave como la visibilidad en las intersecciones, los flujos peatonales, el número de fases del semáforo, los flujos vehiculares en horarios punta tarde y fuera de punta no pudieron ser recolectadas ni analizadas, lo que limita la

capacidad explicativa del modelo y la generalización de los resultados. Del mismo modo, la cantidad de intersecciones analizadas constituye una limitación, dado que en este estudio se consideraron 100; idealmente, este número podría ampliarse a 200 o 300 para fortalecer la robustez del análisis y la validez de los resultados.

Otra limitación relevante es la posible existencia de subregistro en los datos de siniestros de tránsito, especialmente en aquellos eventos de menor gravedad que no son reportados a las autoridades. Además, la infraestructura vial y el entorno urbano son dinámicos y pueden experimentar cambios a lo largo del tiempo, como la instalación de nuevos semáforos, la apertura de comercios o la modificación de rutas de transporte público, lo que puede alterar los patrones de siniestralidad observados. Por lo tanto, se recomienda actualizar periódicamente la base de datos y complementar los análisis con información cualitativa y observaciones en terreno.

A pesar de estas limitaciones, el estudio constituye un aporte significativo para la comprensión de la siniestralidad vial en Temuco y ofrece una base sólida para la toma de decisiones en materia de seguridad vial. Los resultados obtenidos permiten orientar la priorización de intervenciones, el diseño de políticas públicas y la asignación de recursos hacia las zonas y factores de mayor riesgo. Para futuras investigaciones, se sugiere ampliar la base de variables y explorar otros tipos de modelos analíticos que permitan identificar patrones complejos y mejorar la predicción de siniestros, como modelos basados en técnicas de Machine Learning.

## Bibliografía

- Anderson, T. (2009). Kernel density estimation and K-means clustering to profile road accident hotspots. *Accident Analysis y Prevention*, 41(3), 359-64. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.12.014>
- Andrade, L., Nickenig Vissoci, J. R., Rodrigues, C., Finato, K., Carvalho, E., Pietrobon, R., . . . Carvalho, M. (2014). Brazilian Road Traffic Fatalities: A Spatial and Environmental Analysis. *PLOS One*, 9(1), e87244. <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087244>
- Anis, M., Geedipally, S. R., y Lord, D. (2025). Pedestrian crash causation analysis near bus stops: Insights from random parameters Negative Binomial–Lindley model. *Accident Analysis y Prevention*, 220, 108137. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2025.108137>
- Antonucci, N. D., Hardy, K. K., Slack, K. L., Pfefer, R., y Neuman, T. R. (2004). *A guide for addressing collisions with trees in hazardous locations (NCHRP Report 500, Vol. 12)*. National Cooperative Highway Research Program.
- Carabineros de Chile. (2022). Buscador Ordenes Generales: <https://buscadorog.carabineros.cl/?page=18>. Orden Nro. 2938.
- Carabineros de Chile. (2025). Transparencia ProActiva: [https://www.carabineros.cl/transparencia/tproactiva/rpro\\_os2.html](https://www.carabineros.cl/transparencia/tproactiva/rpro_os2.html)
- Chen, C., y Xie, Y. (2016). Modeling the effects of AADT on predicting multiple-vehicle crashes at urban and suburban signalized intersections. *Accident Analysis y Prevention*, 91, 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.02.016>
- Cleveland, W. S. (1993). *Visualizing Data*. ATyT Bell Laboratories.
- Clifton, K. J., y Kreamer-Fults, K. (2007). An examination of the environmental attributes associated with pedestrian-vehicular crashes near public schools. *Accid Anal Prev*, 39(4), 708-15. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.11.003>
- CONASET. (2024). Obtenido el 12 de Mayo de 2025, de Estadísticas Regionales: <https://www.conaset.cl/programa/observatorio-datos-estadistica/biblioteca-observatorio/estadisticas-regionales/>
- CONASET. (2024). Observatorio de Seguridad Vial: <https://www.conaset.cl/wp-content/uploads/2024/06/Informe-estad%C3%ADstica-2023-CONASET.pdf>
- CONASET. (2025). Obtenido el 10 de Mayo de 2025, de Glosario: <https://www.conaset.cl/biblioteca-observatorio/glosario/>
- CONASET. (2025). Descarga de capas: <https://mapas-conaset.opendata.arcgis.com/>
- Dal' Canton, L. E., Maltauro, T. C., y Weverton, R. V. (2020). Geographic Information System In The Spatial Analysis Of Urban Traffic Accidents In Cascavel, Paraná, Brazil. *Revista Baru - Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos*, 06(e8149), 01-18. <https://doi.org/10.18224/baru.v6i1.8149>
- Dobson, A. J., y Barnett, A. G. (2018). *An Introduction to Generalized Linear Models*. CRC Press.
- Dufeu, R. (2019). *Modelación de Factores Determinantes de Accidentes en Intersecciones Urbanas*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.
- Ewing, R., y Dumbaugh, E. (2009). The Built Environment and Traffic Safety: A Review of Empirical Evidence. *Journal of Planning Literature*, 23(4), 347-367. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/0885412209335553>
- Federal Highway Administration. (2017). *Federal Highway Administration*. U.S. Department of Transportation.

- Fisher, R. A. (1922). *On the mathematical foundations of theoretical statistics*. Royal Society. <https://doi.org/https://doi.org/10.1098/rsta.1922.0009>
- Greibe, P. (2003). Accident prediction models for urban roads. *Accident Analysis y Prevention*, 35(2), 273-285. [https://doi.org/10.1016/s0001-4575\(02\)00005-2](https://doi.org/10.1016/s0001-4575(02)00005-2)
- Hilbe, J. M. (2011). *Negative Binomial Regression*. Cambridge University Press.
- INE. (2023). Permisos de circulación: <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/transporte-y-comunicaciones/permiso-de-circulacion>
- INE. (2025). Obtenido el 25 de Mayo de 2025, de Censos de Población y Vivienda: <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda>
- Kamh, H., Saleh H. , A., Khattak, A., Alyami, M., y Almujiabah, H. (2024). Exploring Road Traffic Accidents Hotspots Using Clustering Algorithms and GIS-Based Spatial Analysis. *IEEE Access*, PP(99), 1-1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3443245>
- Kumara, S. S., y Chin, H. C. (2003). Modeling accident occurrence at signalized tee intersections with special emphasis on excess zeros. *Traffic Injury Prevention*, 4(1), 53-7. <https://doi.org/10.1080/15389580309852>
- Le, K. G., Liu, P., y Lin, L.-T. (2019). Determining the road traffic accident hotspots using GIS-based temporal-spatial statistical analytic techniques in Hanoi, Vietnam. *Geo-Spatial Information Science*, 23(2), 153-164. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10095020.2019.1683437>
- Lord, D., y Mannering, F. (2010). The statistical analysis of crash-frequency data: A review and assessment of methodological alternatives. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(5), 291-305. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.02.001>
- Lord, D., Washington, S. P., y Ivan, J. N. (2005). Poisson, Poisson-gamma and zero-inflated regression models of motor vehicle crashes: balancing statistical fit and theory. *Accident Analysis y Prevention*, 37(1), 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2004.02.004>
- Louviere, J. J., Hensher, D. A., y Swait, J. D. (2000). *Stated choice methods: Analysis and applications*. Cambridge University Press.
- Martínez, H. (2020). *Estimación de un Modelo de Predicción de Frecuencia de Accidentes de Tránsito en Intersecciones Urbanas*. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de la Frontera.
- Mitra, S., y Washington, S. (2007). On the nature of over-dispersion in motor vehicle crash prediction models. *Accident Analysis y Prevention*, 39(3), 459-68. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.08.002>
- Nelder, J. A., y Wedderburn, R. W. (1972). Generalized Linear Models. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 135(3), 370-384. <https://doi.org/https://www.jstor.org/stable/2344614>
- Peña, H. (2024). *Identificación de factores de riesgo de colisión de vehículos en intersecciones urbanas señalizadas mediante herramientas de aprendizaje automático*. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.
- Rettallack, A. E., y Ostendorf, B. (2020). Relationship Between Traffic Volume and Accident Frequency at Intersections. *Int J Environ Res Public Health*, 17(4), 1393. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijerph17041393>
- Retting, R. A., Ferguson, S. A., y McCartt, A. T. (2003). A Review of Evidence-Based Traffic Engineering Measures Designed to Reduce Pedestrian–Motor Vehicle Crashes. *Am J Public Health*, 93(9), 1456-63. <https://doi.org/10.2105/ajph.93.9.1456>

- SECTRA Área Sur. (2022). *Biblioteca Digital de Transporte*. Mejoramiento infraestructura del transporte público Temuco - Padre Las Casas: <https://biblioteca.mtt.gob.cl/documento/4bd854e7-9bbc-4585-a073-a89c0600a8b4>
- Silverman, B. (1998). *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman and Hall. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781315140919>
- Tukey, J. W. (1981). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/bimj.4710230408>
- Turner, B., Job, S., y Mitra, S. (2021). *Guide for Road Safety Interventions: Evidence of What Works and What Does Not Work*. World Bank.
- Wang, X., Abdel-Aty, M., y Brady, P. (2006). Crash Estimation at Signalized Intersections: Significant Factors and Temporal Effect. *Transportation Research Record Journal*, 153(1), 10-20. <https://doi.org/10.3141/1953-02>
- World Health Organization. (2018). *Global status report on road safety*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications-detail/9789241565684>
- World Health Organization. (2023). World Health Organization: <https://assets.bbhuh.io/dotorg/sites/64/2023/12/WHO-Global-status-report-on-road-safety-2023.pdf>
- Xie, Z., y Yan, J. (2008). Kernel Density Estimation of Traffic Accidents in a Network Space. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32(5), 396-406. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.05.001>
- Yao, S., Loo, B., y Yang, B. (2015). Traffic collisions in space: four decades of advancement in applied GIS. *Annals of GIS*, 22(1), 1-14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/19475683.2015.1085440>

## Anexos

## Anexo A. Resultados de la modelación Binomial Negativo.

Tabla A. 1 Resultados del conjunto 3.

| Fórmula de predicción de siniestros de tránsito (2019-2023)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |            |                |               |         |                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------|---------------|---------|----------------|
| log(SiniestrosTotales) = 0.9601 + 0.3273 * ZonaCom - 0.0039 * ZonaMixta + 0.5308 * IntCruz + 0.4805 * IntY - 0.2106 * MedianaPrinParcialmente + 0.2384 * MedianaPrinCompletamente - 0.6384 * MedianaSecParcial - 0.0281 * MedianaSecCompletamente - 0.0305 * ControlCeda - 0.4122 * ControlPare - 0.2137 * PistaGiroIzqPrinSi - 0.3637 * PistaGiroDerPrinSi + 0.2246 * PistaGiroIzqSecSi + 0.127 * PistaGiroDerSecSi + 0.1224 * GiroIzqPrin + 0.1704 * GiroIzqSec + 0.1354 * NParaderos + 0.0513 * NSalud - 0.0208 * NEducacion + 0.0152 * NComercios - 0.0304 * NRamasAcceso + 0.1384 * NPistasPrinAcc1 + 0.0178 * NPistasSecAcc1 - 0.0351 * NMovimientos + 2e-04 * FlujoRP + 4e-04 * FlujoRS |            |                |               |         |                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |            |                |               |         |                |
| Métricas de desempeño                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |            |                |               |         |                |
| RMSE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | MAE        | AIC            | McFadden's R² |         |                |
| 10.0572                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 6.9216     | 736.8453       | 0.1363        |         |                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |            |                |               |         |                |
| Resultados del modelo de regresión Binomial Negativo (2019-2023)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |            |                |               |         |                |
| Variable                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Estimación | Error estándar | Valor Z       | Valor p | Porcentaje (%) |
| Intercepto                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0.9601     | 0.3673         | 2.6142        | 0.0089  | 161.21         |
| Tipo de zona: comercial                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0.3273     | 0.1799         | 1.8196        | 0.0688  | 38.73          |
| Tipo de zona: mixta                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | -0.0039    | 0.1491         | -0.0264       | 0.9789  | -0.39          |
| Tipo de intersección: cruz                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0.5308     | 0.1676         | 3.1670        | 0.0015  | 70.02          |
| Tipo de intersección: Y                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0.4805     | 0.2646         | 1.8161        | 0.0694  | 61.68          |
| Mediana rama principal: parcialmente con mediana                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | -0.2106    | 0.4123         | -0.5108       | 0.6095  | -18.99         |
| Mediana rama principal: completamente con mediana                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0.2384     | 0.1873         | 1.2725        | 0.2032  | 26.92          |
| Mediana rama secundaria: parcialmente con mediana                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | -0.6384    | 0.2881         | -2.2157       | 0.0267  | -47.19         |
| Mediana rama secundaria: completamente con mediana                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | -0.0281    | 0.2281         | -0.1232       | 0.9019  | -2.77          |
| Tipo de control: ceda el paso                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | -0.0305    | 0.1804         | -0.1691       | 0.8657  | -3.00          |
| Tipo de control: pare                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | -0.4122    | 0.2098         | -1.9647       | 0.0494  | -33.78         |
| Pista exclusiva giro izquierda rama principal: Sí                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | -0.2137    | 0.1798         | -1.1887       | 0.2346  | -19.24         |
| Pista exclusiva giro derecha rama principal: Sí                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | -0.3637    | 0.1520         | -2.3923       | 0.0167  | -30.49         |
| Pista exclusiva giro izquierda rama secundaria: Sí                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.2246     | 0.1767         | 1.2708        | 0.2038  | 25.18          |

| Variable                                         | Estimación | Error estándar | Valor Z  | Valor p | Porcentaje (%) |
|--------------------------------------------------|------------|----------------|----------|---------|----------------|
| Pista exclusiva giro derecha rama secundaria: Sí | 0.1270     | 0.1563         | 0.8128   | 0.4164  | 13.54          |
| Giro izquierda en rama principal: Sí             | 0.1224     | 0.1449         | 0.8444   | 0.3984  | 13.02          |
| Giro izquierda en rama secundaria: Sí            | 0.1704     | 0.1603         | 1.0631   | 0.2877  | 18.58          |
| Nº de paraderos                                  | 0.1354     | 0.0628         | 2.1559   | 0.0311  | 14.50          |
| Nº de centros de salud                           | 0.0513     | 0.1574         | 0.3262   | 0.7443  | 5.27           |
| Nº de centros de educación                       | -0.0208    | 0.0505         | -0.411   | 0.6811  | -2.05          |
| Nº de comercios                                  | 0.0152     | 0.0634         | 0.2392   | 0.8109  | 1.53           |
| Nº de ramas de accesos                           | -0.0304    | 0.1345         | -0.22600 | 0.8212  | -2.99          |
| Nº de pistas de la rama principal                | 0.1384     | 0.0600         | 2.3079   | 0.0210  | 14.85          |
| Nº de pistas de la rama secundaria               | 0.0178     | 0.0866         | 0.2051   | 0.8375  | 1.79           |
| Nº de movimientos                                | -0.0351    | 0.0338         | -1.0381  | 0.2992  | -3.45          |
| Flujo de la rama principal                       | 0.0002     | 0.0001         | 3.2096   | 0.0013  | 0.02           |
| Flujo de la rama secundaria                      | 0.0004     | 0.0001         | 2.8484   | 0.0044  | 0.04           |

**Tabla A. 2** Resultados del conjunto 4.

| Fórmula de predicción de siniestros de tránsito (2019-2023)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |                |          |               |                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------|----------|---------------|----------------|
| log(SiniestrosTotales) = -6.0945 + 0.1312 * ZonaCom - 0.2128 * ZonaMixta + 0.5596 * IntCruz + 0.5657 * IntY + 0.0766 * MedianaPrinParcialmente - 0.032 * MedianaPrinCompletamente - 0.6263 * MedianaSecParcial - 0.1405 * MedianaSecCompletamente + 0.0675 * ControlCeda - 0.2562 * ControlPare - 0.242 * PistaGiroIzqPrinSi - 0.3766 * PistaGiroDerPrinSi + 0.1808 * PistaGiroIzqSecSi + 0.0434 * PistaGiroDerSecSi + 0.2382 * GiroIzqPrin + 0.316 * GiroIzqSec + 0.1585 * NParaderos - 0.0401 * NSalud - 0.0162 * NEducacion + 0.0988 * NComercios + 0.0191 * NRamasAcceso + 0.098 * Promedio.de.pistas.rama.principal..redondeado. + 0.0975 * Promedio.de.pistas.rama.secundaria..redondeado. - 0.045 * NMovimientos + offset(log(Flujo)) |            |                |          |               |                |
| Métricas de desempeño                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |            |                |          |               |                |
| RMSE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | MAE        | AIC            |          | McFadden's R² |                |
| 10.7219                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 7.4431     | 739.6586       |          | 0.0668        |                |
| Resultados del modelo de regresión Binomial Negativo (2019-2023)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |            |                |          |               |                |
| Variable                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Estimación | Error estándar | Valor Z  | Valor p       | Porcentaje (%) |
| Intercepto                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | -6.0945    | 0.3702         | -16.4619 | 0             | -99.77         |
| Tipo de zona: comercial                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0.1312     | 0.1913         | 0.6859   | 0.4928        | 14.02          |
| Tipo de zona: mixta                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | -0.2128    | 0.1533         | -1.3878  | 0.1652        | -19.16         |

| Variable                                           | Estimación | Error estándar | Valor Z | Valor p | Porcentaje (%) |
|----------------------------------------------------|------------|----------------|---------|---------|----------------|
| Tipo de intersección: cruz                         | 0.5596     | 0.1685         | 3.3213  | 0.0009  | 75.00          |
| Tipo de intersección: Y                            | 0.5657     | 0.2759         | 2.0502  | 0.0403  | 76.07          |
| Mediana rama principal: parcialmente con mediana   | 0.0766     | 0.4246         | 0.1804  | 0.8569  | 7.96           |
| Mediana rama principal: completamente con mediana  | -0.032     | 0.1826         | -0.1751 | 0.8610  | -3.15          |
| Mediana rama secundaria: parcialmente con mediana  | -0.6263    | 0.2898         | -2.1612 | 0.0307  | -46.54         |
| Mediana rama secundaria: completamente con mediana | -0.1405    | 0.2368         | -0.5936 | 0.5528  | -13.11         |
| Tipo de control: ceda el paso                      | 0.0675     | 0.1856         | 0.3637  | 0.7161  | 6.98           |
| Tipo de control: pare                              | -0.2562    | 0.2074         | -1.2352 | 0.2168  | -22.60         |
| Pista exclusiva giro izquierda rama principal: Sí  | -0.2420    | 0.1751         | -1.3822 | 0.1669  | -21.49         |
| Pista exclusiva giro derecha rama principal: Sí    | -0.3766    | 0.1583         | -2.3791 | 0.0174  | -31.38         |
| Pista exclusiva giro izquierda rama secundaria: Sí | 0.1808     | 0.1834         | 0.9855  | 0.3244  | 19.81          |
| Pista exclusiva giro derecha rama secundaria: Sí   | 0.0434     | 0.1639         | 0.2649  | 0.7911  | 4.44           |
| Giro izquierda en rama principal: Sí               | 0.2382     | 0.1489         | 1.5998  | 0.1096  | 26.89          |
| Giro izquierda en rama secundaria: Sí              | 0.3160     | 0.1604         | 1.9698  | 0.0489  | 37.16          |
| N° de paraderos                                    | 0.1585     | 0.0628         | 2.5231  | 0.0116  | 17.17          |
| N° de centros de salud                             | -0.0401    | 0.1580         | -0.2537 | 0.7997  | -3.93          |
| N° de centros de educación                         | -0.0162    | 0.0521         | -0.3114 | 0.7555  | -1.61          |
| N° de comercios                                    | 0.0988     | 0.065          | 1.5187  | 0.1288  | 10.38          |
| N° de ramas de accesos                             | 0.0191     | 0.1377         | 0.1389  | 0.8896  | 1.93           |
| Promedio de pistas en rama principal               | 0.098      | 0.0591         | 1.6588  | 0.0972  | 10.30          |
| Promedio de pistas en rama secundaria              | 0.0975     | 0.0946         | 1.0298  | 0.3031  | 10.24          |
| N° de movimientos                                  | -0.045     | 0.0351         | -1.2829 | 0.1995  | -4.40          |

Tabla A. 3 Resultados del conjunto 5.

| Fórmula de predicción de siniestros de tránsito (2019-2023)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |            |                |               |         |                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------|---------------|---------|----------------|
| log(SiniestrosTotales) = -5.8366 + 0.1316 * ZonaCom - 0.2143 * ZonaMixta + 0.4913 * IntCruz + 0.5888 * IntY + 0.0582 * ControlCeda - 0.2451 * ControlPare + 0.0211 * Presencia.de.Mediana.en.rama.principalSí - 0.2396 * Presencia.de.Mediana.en.rama.secundariaSí - 0.1805 * PistaGiroIzqPrinSi - 0.3802 * PistaGiroDerPrinSi + 0.3015 * PistaGiroIzqSecSi - 0.0621 * PistaGiroDerSecSi + 0.2018 * GiroIzqPrin + 0.2627 * GiroIzqSec + 0.1672 * NParaderos - 0.0815 * NSalud - 0.0054 * NEducacion + 0.0904 * NComercios - 0.0626 * NRamasAcceso + 0.0908 * NPistasPrinAcc1 + 0.0995 * N...de.pistas.de.la.rama.secundariaacceso.1 - 0.0319 * NMovimientos + offset(log(Flujo)) |            |                |               |         |                |
| Métricas de desempeño                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |            |                |               |         |                |
| RMSE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | MAE        | AIC            | McFadden's R² |         |                |
| 10.5982                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 7.4044     | 738.5147       | 0.1240        |         |                |
| Resultados del modelo de regresión Binomial Negativo (2019-2023)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |            |                |               |         |                |
| Variable                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Estimación | Error estándar | Valor Z       | Valor p | Porcentaje (%) |
| Intercepto                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | -5.8366    | 0.3518         | -16.589       | 0       | -99.71         |
| Tipo de zona: comercial                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0.1316     | 0.1869         | 0.7037        | 0.4816  | 14.06          |
| Tipo de zona: mixta                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | -0.2143    | 0.1549         | -1.383        | 0.1667  | -19.29         |
| Tipo de intersección: cruz                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 0.4913     | 0.1669         | 2.9430        | 0.0033  | 63.44          |
| Tipo de intersección: Y                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0.5888     | 0.2784         | 2.1147        | 0.0345  | 80.17          |
| Mediana rama principal: Si                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 0.0582     | 0.1775         | 0.3279        | 0.7430  | 5.99           |
| Mediana rama secundaria: Si                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | -0.2451    | 0.2094         | -1.1703       | 0.2419  | -21.74         |
| Tipo de control: ceda el paso                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 0.0211     | 0.1773         | 0.1192        | 0.9051  | 2.14           |
| Tipo de control: pare                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | -0.2396    | 0.2190         | -1.0944       | 0.2738  | -21.31         |
| Pista exclusiva giro izquierda rama principal: Sí                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | -0.1805    | 0.1742         | -1.0359       | 0.3003  | -16.51         |
| Pista exclusiva giro derecha rama principal: Sí                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | -0.3802    | 0.1608         | -2.3639       | 0.0181  | -31.63         |
| Pista exclusiva giro izquierda rama secundaria: Sí                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0.3015     | 0.1738         | 1.7346        | 0.0828  | 35.18          |
| Pista exclusiva giro derecha rama secundaria: Sí                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | -0.0621    | 0.1495         | -0.4155       | 0.6778  | -6.02          |
| Giro izquierda en rama principal: Sí                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.2018     | 0.1492         | 1.3521        | 0.1764  | 22.36          |
| Giro izquierda en rama secundaria: Sí                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.2627     | 0.1604         | 1.6376        | 0.1015  | 30.04          |
| Nº de paraderos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0.1672     | 0.0633         | 2.6430        | 0.0082  | 18.20          |
| Nº de centros de salud                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | -0.0815    | 0.1583         | -0.5146       | 0.6069  | -7.82          |
| Nº de centros de educación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | -0.0054    | 0.0520         | -0.1033       | 0.9177  | -0.54          |
| Nº de comercios                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0.0904     | 0.0654         | 1.3827        | 0.1667  | 9.46           |
| Nº de ramas de accesos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | -0.0626    | 0.1377         | -0.4545       | 0.6494  | -6.07          |

| <b>Variable</b>                    | <b>Estimación</b> | <b>Error estándar</b> | <b>Valor Z</b> | <b>Valor p</b> | <b>Porcentaje (%)</b> |
|------------------------------------|-------------------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------------|
| N° de pistas de la rama principal  | 0.0908            | 0.0563                | 1.6130         | 0.1067         | 9.50                  |
| N° de pistas de la rama secundaria | 0.0995            | 0.0884                | 1.1250         | 0.2606         | 10.46                 |
| N° de movimientos                  | -0.0319           | 0.0352                | -0.9067        | 0.3646         | -3.14                 |

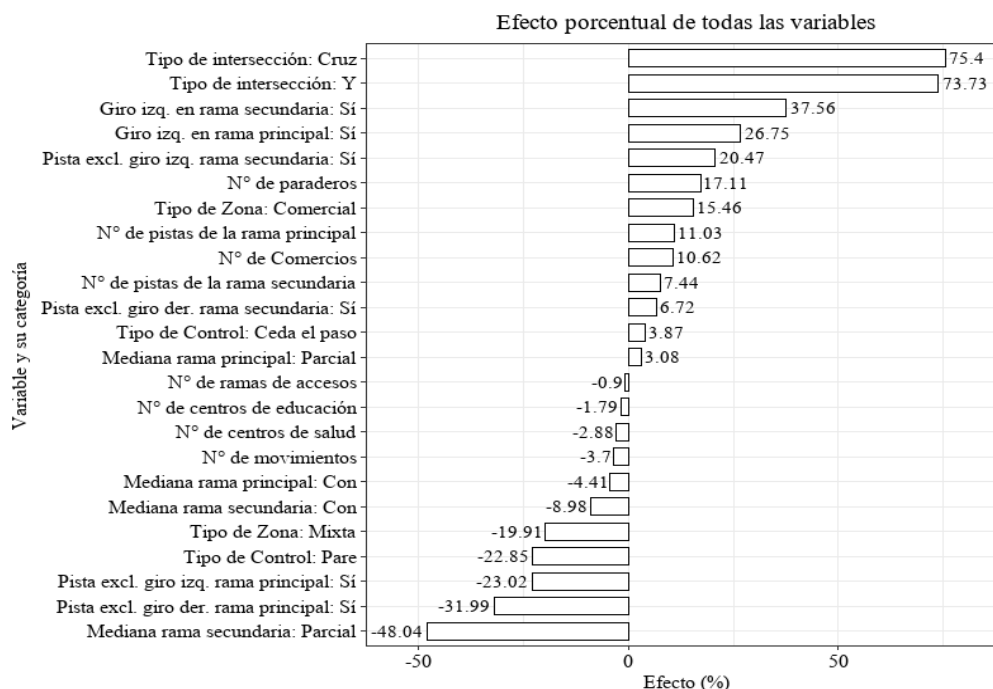
**Anexo B.** Comparación de siniestros observados y predichos.**Tabla B. 1** Resultados del modelo seleccionado para el periodo 2019-2023.

| Número | Siniestros observados | Siniestros predichos (redondeados) |
|--------|-----------------------|------------------------------------|
| 1      | 51                    | 46                                 |
| 2      | 48                    | 38                                 |
| 3      | 24                    | 28                                 |
| 4      | 32                    | 29                                 |
| 5      | 27                    | 24                                 |
| 6      | 38                    | 49                                 |
| 7      | 23                    | 40                                 |
| 8      | 22                    | 19                                 |
| 9      | 12                    | 40                                 |
| 10     | 4                     | 9                                  |
| 11     | 10                    | 9                                  |
| 12     | 36                    | 51                                 |
| 13     | 25                    | 68                                 |
| 14     | 36                    | 19                                 |
| 15     | 35                    | 50                                 |
| 16     | 23                    | 31                                 |
| 17     | 25                    | 25                                 |
| 18     | 43                    | 31                                 |
| 19     | 30                    | 32                                 |
| 20     | 79                    | 70                                 |
| 21     | 39                    | 36                                 |
| 22     | 20                    | 23                                 |
| 23     | 11                    | 13                                 |
| 24     | 37                    | 24                                 |
| 25     | 35                    | 25                                 |
| 26     | 11                    | 16                                 |
| 27     | 25                    | 21                                 |
| 28     | 18                    | 22                                 |
| 29     | 29                    | 32                                 |
| 30     | 21                    | 34                                 |
| 31     | 27                    | 35                                 |
| 32     | 49                    | 31                                 |
| 33     | 27                    | 25                                 |
| 34     | 14                    | 19                                 |
| 35     | 22                    | 20                                 |
| 36     | 5                     | 11                                 |
| 37     | 28                    | 21                                 |
| 38     | 29                    | 17                                 |
| 39     | 13                    | 18                                 |

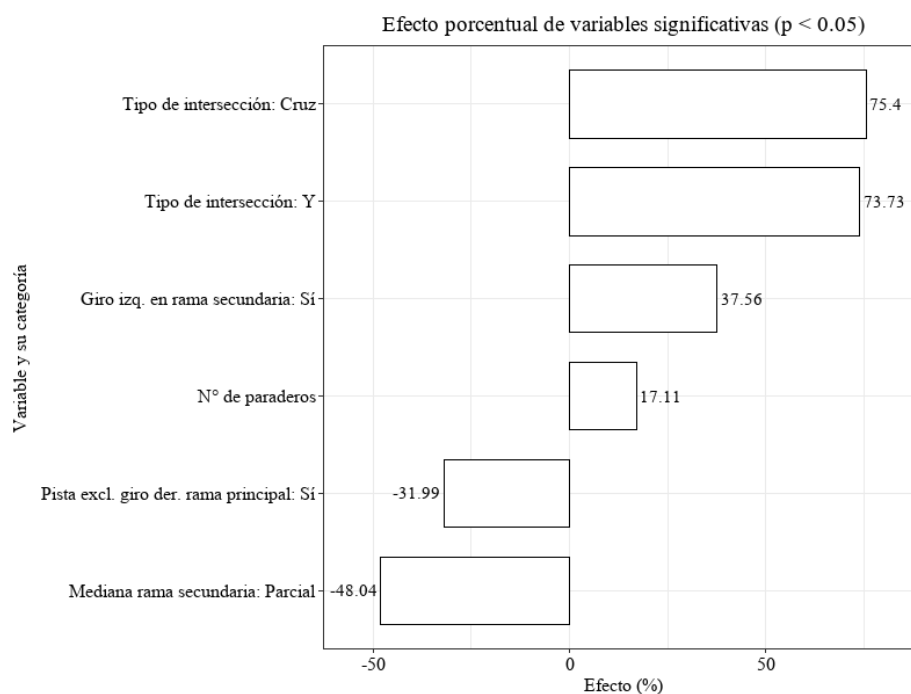
| Número | Siniestros observados | Siniestros predichos (redondeados) |
|--------|-----------------------|------------------------------------|
| 40     | 21                    | 21                                 |
| 41     | 16                    | 22                                 |
| 42     | 22                    | 22                                 |
| 43     | 6                     | 9                                  |
| 44     | 27                    | 15                                 |
| 45     | 5                     | 5                                  |
| 46     | 6                     | 9                                  |
| 47     | 13                    | 8                                  |
| 48     | 25                    | 15                                 |
| 49     | 9                     | 12                                 |
| 50     | 31                    | 30                                 |
| 51     | 25                    | 28                                 |
| 52     | 96                    | 52                                 |
| 53     | 7                     | 9                                  |
| 54     | 41                    | 18                                 |
| 55     | 28                    | 23                                 |
| 56     | 11                    | 31                                 |
| 57     | 38                    | 26                                 |
| 58     | 17                    | 18                                 |
| 59     | 7                     | 13                                 |
| 60     | 16                    | 10                                 |
| 61     | 37                    | 25                                 |
| 62     | 27                    | 27                                 |
| 63     | 26                    | 34                                 |
| 64     | 27                    | 18                                 |
| 65     | 7                     | 17                                 |
| 66     | 9                     | 14                                 |
| 67     | 5                     | 11                                 |
| 68     | 13                    | 9                                  |
| 69     | 16                    | 11                                 |
| 70     | 8                     | 4                                  |
| 71     | 7                     | 21                                 |
| 72     | 13                    | 14                                 |
| 73     | 10                    | 6                                  |
| 74     | 12                    | 8                                  |
| 75     | 4                     | 8                                  |
| 76     | 1                     | 1                                  |
| 77     | 1                     | 4                                  |
| 78     | 2                     | 2                                  |
| 79     | 5                     | 6                                  |
| 80     | 28                    | 10                                 |
| 81     | 1                     | 13                                 |
| 82     | 2                     | 5                                  |

| Número      | Siniestros observados | Siniestros predichos (redondeados) |
|-------------|-----------------------|------------------------------------|
| 83          | 16                    | 24                                 |
| 84          | 5                     | 12                                 |
| 85          | 21                    | 13                                 |
| 86          | 10                    | 17                                 |
| 87          | 14                    | 18                                 |
| 88          | 2                     | 3                                  |
| 89          | 23                    | 19                                 |
| 90          | 8                     | 19                                 |
| 91          | 13                    | 8                                  |
| 92          | 7                     | 10                                 |
| 93          | 16                    | 16                                 |
| 94          | 7                     | 19                                 |
| 95          | 8                     | 21                                 |
| 96          | 14                    | 9                                  |
| 97          | 5                     | 3                                  |
| 98          | 2                     | 8                                  |
| 99          | 6                     | 6                                  |
| 100         | 7                     | 5                                  |
| <b>Suma</b> | <b>1995</b>           | <b>2045</b>                        |

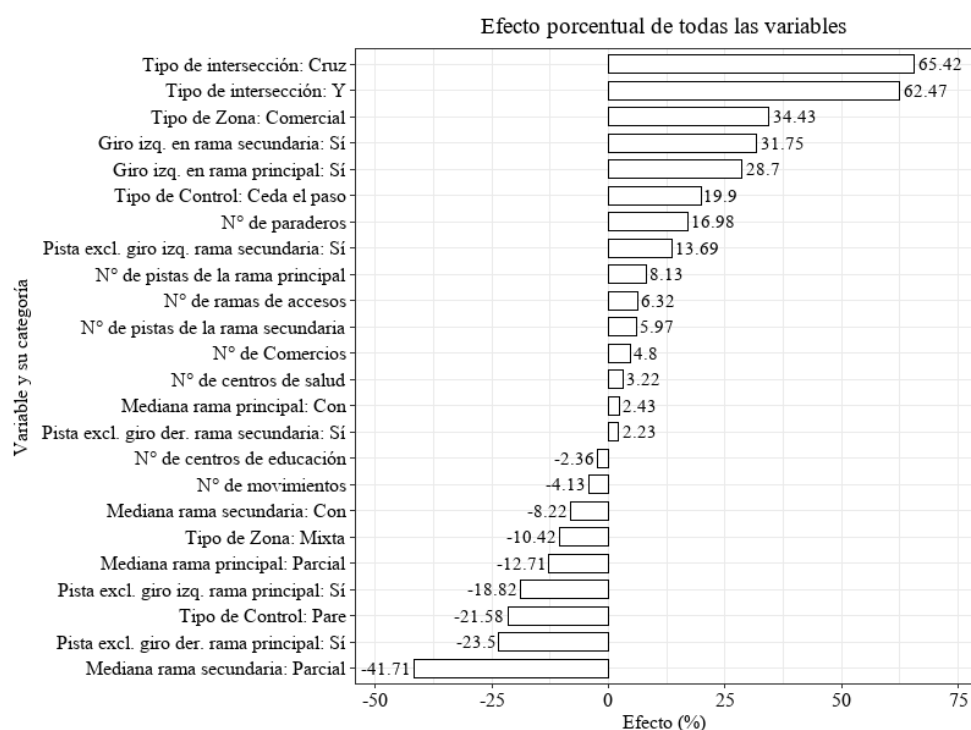
### Anexo C. Visualización de los resultados del modelo Binomial Negativo seleccionado.



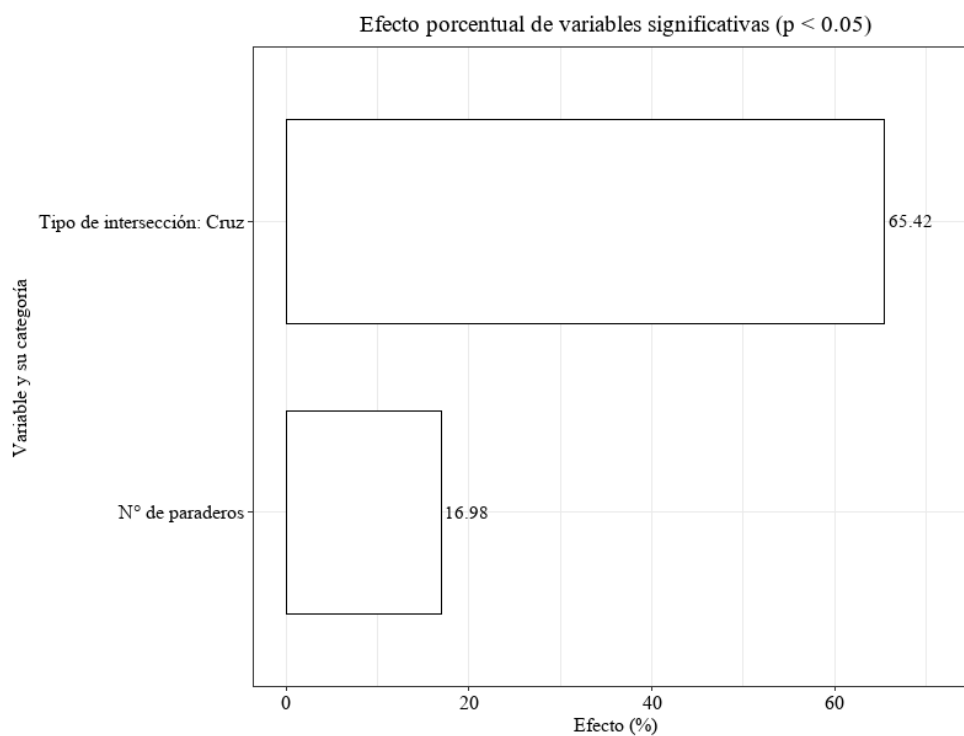
**Figura C. 1** Efecto porcentual estimado por el modelo a partir de siniestros registrados (2019–2023).



**Figura C. 2** Efecto porcentual de las variables significativas estimado por el modelo a partir de siniestros registrados (2019–2023).



**Figura C. 3** Efecto porcentual estimado por el modelo a partir del promedio anual de siniestros registrados (2019–2023).



**Figura C. 4** Efecto porcentual de las variables significativas estimado por el modelo a partir del promedio anual de siniestros registrados (2019–2023).