

Caracterización de factores de riesgo en accidentalidad de peatones en Bucaramanga

Edison Correa Fuentes y Gersson Arley Vera Gómez

Trabajo de Grado en Modalidad de Artículo de Investigación para Optar al Título de

Ingeniería civil

Director

Miller Humberto Salas Rondón

Doctor en Gestión del Territorio e Infraestructuras del Transporte

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas

Escuela e Ingeniería Civil Ingeniería Civil

Programa Académico

Bucaramanga

2025

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	9
1. Metodología .....	10
2. Resultados .....	12
2.1 Revisión bibliográfica.....	12
2.1.1 Infraestructura y Accesibilidad:.....	14
2.1.2 Comportamiento y Distracción:.....	15
2.1.3 Factores Socioeconómicos:.....	15
2.1.4 Variables Demográficas:.....	16
2.1.5 Estado Emocional y Percepción de Riesgo:.....	16
2.1.6 Factores Ambientales y Contextuales:.....	17
2.2 Dimensión Temporal de la Accidentalidad.....	18
2.2.1 Caracterización Espacial de los Accidentes.....	21
2.3 Incidencia del Componente Vehicular.....	23
2.4 Priorización de Factores para la Intervención.....	25
3. Conclusiones.....	26
4. Recomendaciones .....	28
4.1 Mejora en la recolección y disponibilidad de datos:.....	29
4.2 Intervenciones temporalmente diferenciadas:.....	29
4.3 Mejoras infraestructurales focalizadas:.....	29
4.4 Control vehicular específico:.....	30
4.5 Equidad en la seguridad vial:.....	30

Referencias Bibliográficas ..... 31

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Resumen de artículos relacionados a cada factor. ....	17

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Distribución de Estudios por Variables de Accidentalidad Peatonal. ....	18
Figura 2 Distribución de accidentes por hora y severidad. ....	19
Figura 3 Tendencia mensual de accidentes. ....	21
Figura 4 Distribución espacial de accidentes peatonales en Bucaramanga por comuna (2012-2023). ....	22
Figura 5 Distribución de Accidentes por Comuna y Severidad. ....	23
Figura 6 Proporción media de tipos de vehículos por severidad. ....	24
Figura 7 Accidentalidad registrada por los diferentes vehículos en las horas críticas. ....	25

### **Lista de Apéndices**

Apéndices adjuntos, pueden ser consultados en la base de datos de la biblioteca UIS.

**Apendice A.** Visualizaciones.

**Apendice B.** 03\_analisis\_temporal

**Apendice C.** 04\_analisis\_espacial

**Apendice D.** 05\_analisis\_severidad

**Apendice E.** 06\_analisis\_vehiculos

**Apendice F.** 07\_analisis\_correlaciones

**Apendice G.** Datos de accidentes

## Resumen

**Título:** Caracterización de factores de riesgo en accidentalidad de peatones en Bucaramanga

**Autor:** Gersson Arley Vera Gómez y Edison Correa Fuentes

**Palabras Clave:** seguridad vial, accidentalidad de peatones, comportamiento de conductores y peatones, factores de riesgo, educación vial.

La accidentalidad peatonal en Bucaramanga se ve incrementada por factores como el comportamiento de conductores y peatones, infraestructura vial deficiente (ej. falta de cruces seguros), desigualdad socioeconómica, aspectos psicológicos, distracciones tecnológicas (uso de dispositivos móviles al caminar) y falta de accesibilidad para poblaciones vulnerables. Según datos de la Dirección de Tránsito (2012-2023, 11 años), los accidentes presentan patrones críticos: concentración en horas pico (18:00-19:00), fines de semana (viernes y sábado) y zonas comerciales (comunas 12, 15 y 3). Las áreas periféricas (comuna 14) registran mayor mortalidad, vinculada a infraestructura precaria (carpetas dañadas, iluminación insuficiente) y demoras en servicios de emergencia. El estudio propone medidas como: refuerzo de controles viales en horarios y días críticos, mejoras en señalización y cruces peatonales en zonas marginales, programas educativos específicos para conductores de motos y vehículos pesados, y optimización de tiempos de respuesta en emergencias para reducir inequidades territoriales.

---

\*Caracterización de Factores de riesgo en accidentalidad de Peatones en Bucaramanga,

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Pregrado. Director: Miller Humberto Salas Rondón. Doctor en Gestión del territorio e Infraestructura del Transporte.

### Abstract

**Title:** Characterization of risk factors in pedestrian accidents in Bucaramanga

**Author(s):** Gersson Arley Vera Gómez y Edison Correa Fuentes

**Key Words:** road safety, pedestrian accidents, risk factors, urban infrastructure, emergency response equity.

Pedestrian accidents in Bucaramanga are exacerbated by factors such as driver and pedestrian behavior, poor road infrastructure (e.g., lack of safe crossings), socioeconomic inequality, psychological aspects, technological distractions (e.g., mobile phone use while walking), and insufficient accessibility for vulnerable populations. According to data from the Traffic Department (2012–2023, 11 years), accidents exhibit critical patterns: concentration during peak hours (18:00–19:00), weekends (Fridays and Saturdays), and commercial zones (Communes 12, 15, and 3). Peripheral areas (Commune 14) show higher mortality rates, linked to inadequate infrastructure (damaged pavements, poor lighting) and delays in emergency services. The study proposes measures such as: stricter traffic enforcement during high-risk periods, improvements in signage and pedestrian crossings in marginalized areas, targeted educational programs for motorcycle and heavy vehicle drivers, and optimized emergency response times to address territorial inequities.

---

\*Characterization of risk factors in pedestrian accidents in Bucaramanga,

\*\*Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Undergraduate.

Director: Miller Humberto Salas Rondón. Doctor in Territorial Management and Transport Infrastructure.

## Introducción

La accidentalidad peatonal constituye un fenómeno multifactorial que requiere un análisis desde múltiples perspectivas para su comprensión y adecuada intervención. La revisión sistemática de la literatura científica reciente revela seis grandes temáticas que influyen en esta problemática: comportamiento y factores de riesgo, infraestructura y diseño urbano, factores socioeconómicos y desigualdad, aspectos psicológicos y perceptuales, tecnología y sistemas inteligentes, y grupos vulnerables con necesidades específicas.

La infraestructura y el diseño urbano emergen como elementos fundamentales para la seguridad, aunque su efectividad depende de factores socioculturales y comportamentales. El uso creciente de dispositivos móviles representa un riesgo significativo, mientras que las desigualdades socioeconómicas tienen un impacto consistente en los patrones de accidentalidad. Los factores psicológicos y perceptuales también son determinantes en el comportamiento peatonal.

En este contexto, Bucaramanga presenta características particulares que requieren un análisis detallado de sus patrones de accidentalidad peatonal. La presente investigación busca caracterizar los factores de riesgo asociados a estos incidentes en la ciudad, planteándose las siguientes preguntas:

¿Qué patrones espaciales y temporales caracterizan la accidentalidad peatonal en la ciudad?

¿Cómo se relacionan las características del entorno urbano con la ocurrencia y severidad de los accidentes?

¿Qué papel juegan los diferentes tipos de vehículos en la severidad de los incidentes?

El alcance del estudio comprende el análisis de datos de accidentalidad peatonal registrados entre 2012 y 2023, abarcando las 17 comunas de la ciudad. La investigación se centra en la

identificación de patrones temporales, espaciales y vehiculares que permitan comprender mejor los factores de riesgo y proponer estrategias efectivas de intervención.

## **1. Metodología**

Para investigar los factores de riesgo asociados a la accidentalidad de peatones, se empleó la API de Scopus, una base de datos bibliográfica reconocida por su amplio alcance y calidad en literatura científica. La búsqueda se configuró mediante Python para obtener artículos en español e inglés, publicados entre 2016 y 2023, utilizando términos como “accidentes peatones riesgos”, “seguridad vial peatones” y “pedestrian accident risk factors”, abarcando tanto estudios locales como internacionales. Se resalta que la elección de Scopus y el uso de Python respondieron a la necesidad de obtener publicaciones revisadas y con rigor científico, frente a otras fuentes que contenían principalmente tesis o trabajos de grado.

Dado el límite de artículos por consulta en la API, se aplicó un proceso de paginación en bloques de 25 resultados, identificándose un total de 79 artículos relacionados, de estos, se seleccionaron 40 artículos específicamente enfocados en el tema de estudio y de estos se identificaron seis grandes temáticas en el estudio de la accidentalidad. Posterior, teniendo en cuenta las variables clave relacionadas con los objetivos de la investigación, se seleccionaron un total de 25 artículos que permitieron identificar a fondo un conjunto de variables clave que influyen en la ocurrencia de accidentes y en la seguridad de los peatones en entornos urbanos.

Tras establecer el marco conceptual mediante la revisión sistemática de literatura, el estudio procedió al análisis de datos locales, basándose en registros de accidentes viales proporcionados por la Dirección de Tránsito de Bucaramanga, abarcando el período entre enero

de 2012 y julio de 2023. El conjunto inicial de datos contenía 38,965 registros, de los cuales se identificaron y extrajeron 3,804 incidentes que involucraban peatones (9.8% del total).

El proceso de validación de calidad y completitud se centró en garantizar la precisión geográfica, categórica y administrativa de los registros. En primer lugar, se excluyeron aquellos casos ubicados fuera de la jurisdicción de Bucaramanga, identificados mediante el análisis de direcciones y coordenadas que correspondían a municipios aledaños como Girón, Floridablanca y Tona. Posteriormente, se abordaron registros con descripciones geográficas ambiguas o incompletas (ej. "Vía Girón, Km 0"), los cuales se resolvieron mediante consulta a mapas digitales (Google Maps, OpenStreetMap) y contextualización histórica.

Adicionalmente, se detectaron inconsistencias en campos categóricos, como errores tipográficos en el tipo de vía (ej. "elle" en lugar de "calle"), que podrían distorsionar los análisis. Para corregirlos, se implementaron scripts en Python que homologaron las variantes a términos estandarizados, asegurando uniformidad en categorías clave. Asimismo, se verificó la asignación de barrios a comunas mediante el Acuerdo 002 de 2013 de la Alcaldía de Bucaramanga, actualizado a diciembre de 2023, contrastando cada registro con la división político-administrativa oficial. En casos de discordancia, se utilizó georreferenciación y cruce con mapas interactivos para reasignar correctamente la ubicación.

Tras este proceso, se obtuvieron 3,651 registros válidos para el análisis (95.9% de los casos iniciales), garantizando la integridad espacial, temporal y categórica de la base de datos.

La preparación de datos incluyó la estandarización de formatos temporales (fechas y horas), la normalización de datos categóricos (gravedad, día de la semana, jornada) y la validación de datos numéricos relacionados con vehículos y personas involucradas. La cobertura espacial comprendió las 17 comunas de Bucaramanga, distribuidas en 144 barrios diferentes.

Para el análisis espacial, se implementó un proceso de georreferenciación basado en la agregación de datos por comuna, lo que permitió visualizar y analizar patrones de concentración de accidentes en diferentes zonas de la ciudad. Esta aproximación facilitó la identificación de áreas de mayor incidencia y la evaluación de factores de riesgo asociados a la ubicación.

El procesamiento de datos y análisis estadísticos se realizaron mediante Python 3.x, utilizando las bibliotecas pandas para la manipulación de datos, folium para la visualización geoespacial, seaborn y matplotlib para gráficos estadísticos, y scipy para análisis estadísticos. Esta implementación facilitó la identificación sistemática de patrones espaciales y temporales en la accidentalidad peatonal.

El conjunto final de datos mostró que el 94.4% de los casos (3,446) resultaron en heridos, 5.5% (201 casos) en víctimas fatales y 0.1% (4 casos) en daños materiales. La distribución temporal evidenció un promedio anual de 329 accidentes durante 2012-2022, con predominancia de incidentes en jornada diurna (64.8%) sobre la nocturna (35.3%).

Esta base de datos depurada permitió realizar análisis estadísticos descriptivos y espaciales para identificar patrones, tendencias y factores de riesgo en la accidentalidad peatonal de Bucaramanga.

## **2. Resultados**

### **2.1 Revisión bibliográfica**

La revisión sistemática de 40 artículos publicados entre 2013 y 2023 revela seis grandes temáticas en el estudio de la accidentalidad peatonal. La identificación de las seis temáticas centrales en el estudio de la accidentalidad peatonal se fundamentó en un análisis de los artículos

revisados y en el procesamiento cuantitativo de los términos clave presentes en la literatura, aplicando un análisis de contenido basado en la frecuencia de aparición de palabras clave dentro de los textos de relevancia de cada estudio.

Comportamiento y factores de riesgo: Los estudios de Torres-Quintero et al. [1], Velázquez Narváez et al. [2], Alonso et al. [3], Escobar et al. [4], Useche et al. [5], Figueroa-Tejada y Goñi [6], Wachnicka y Kulesza [7], Pešić et al. [8], Zhang et al. [9], Saxena [10], Alsaleh et al. [11], y Putranto y Ananda [12] analizan patrones de conducta, uso de dispositivos móviles y comportamiento en intersecciones, incluyendo el impacto de distracciones y grupos etarios como niños (Makalew et al. [13]) y ciclistas (Useche et al. [14]). También destacan factores contribuyentes en accidentes (Liu et al. [15]) y la obediencia a las señales (Navarro-Rosas y Obregón-Biosca [16]).

Infraestructura y Diseño Urbano: Mejía López et al. [17], Lozano Domínguez et al. [18], Cárdenas-Cárdenas et al. [19], Soliz y Pérez-López [20], Andrade y Chaparro [21], Montealegre y Garzón [22], Tanikawa-Obregón y Paz-Gómez [23], Landa-Blanco y Ávila [24], Bando et al. [25], y Roza et al. [26] examinan la relación entre infraestructura peatonal (puentes, intersecciones, calidad de espacios) y seguridad. Estudios como los de Vásquez et al. [27] y Toval-Ruiz et al. [28] destacan la importancia del diseño inclusivo y los factores ambientales.

Factores Socioeconómicos y demográficos: Ramos et al. [29], Montenegro-Martínez et al. [30], Roman-Lazarte et al. [31], Murillo-Hoyos et al. [32], Makalew et al. [13], y Zamee et al. [33] abordan disparidades socioeconómicas, perfiles de riesgo por edad y género, y acceso a salud y rehabilitación.

Aspectos Psicológicos y Perceptuales: Alonso et al. [3], Herrero-Fernández et al. [34], Figueroa-Tejada y Goñi [6], Saxena [10], Putranto y Ananda [12], y Li [35] analizan cómo los

estados emocionales y la percepción de riesgo influyen en la seguridad. Errázuriz [36] resalta la normalización del peligro en las calles y su impacto en las conductas.

Tecnología y Sistemas Inteligentes: Lozano Domínguez et al. [18], Wang et al. [37], Noh et al. [38], Guo et al. [39], y Karolemeas et al. [40] exploran soluciones tecnológicas para mejorar la seguridad peatonal, adaptadas a diferentes grupos poblacionales.

No obstante, para abordar específicamente las variables relacionadas con el objetivo de investigación, se escogieron 25 artículos que, según su contenido, permitieron identificar a fondo un conjunto de variables clave que influyen en la ocurrencia de accidentes y en la seguridad de los peatones en entornos urbanos:

### ***2.1.1 Infraestructura y Accesibilidad:***

La infraestructura y accesibilidad vial emergen como variables críticas en la accidentalidad peatonal. En el diseño de intersecciones, Cárdenas-Cárdenas et al. [19] demostraron una reducción del 21% en accidentes tras implementar mejoras multicomponente. Complementariamente, Navarro-Rosas y Obregón-Biosca [16] identificaron que la obstrucción del cruce peatonal y el flujo vehicular son variables significativas en el comportamiento peatonal.

Respecto a puentes peatonales, Soliz y Pérez-López [20] y Andrade y Chaparro [21] cuestionan su efectividad, encontrando alta incidencia de accidentes en sus proximidades. Landa-Blanco y Ávila [24] reportaron que 17.3% de estudiantes universitarios evita utilizarlos por percepción de inseguridad.

La calidad del espacio público es fundamental según Bando et al. [25] y Roza et al. [26], mientras que Toval-Ruiz et al. [28] añaden que las buenas condiciones de infraestructura pueden paradójicamente aumentar el riesgo por incremento de velocidades vehiculares.

### ***2.1.2 Comportamiento y Distracción:***

Zhang et al. [9] cuantificaron que mirar la pantalla del teléfono aumenta 2.704 veces el riesgo de conflictos, mientras que hablar y escuchar música elevan el riesgo en 1.793 y 1.114 veces respectivamente. Wachnicka y Kulesza [7] y Pešić et al. [8] encontraron que estas distracciones afectan principalmente a jóvenes (70-90% de usuarios).

Liu et al. [15] demostraron que los usuarios jóvenes tienen 23.5% más probabilidad de ceder el paso, mientras que Useche et al. [14] identificaron patrones consistentes de comportamiento de riesgo en peatones, incluyendo errores involuntarios y violaciones intencionales a las normas viales. Entre estos patrones se destacan el cruce imprudente de calles sin observar el tráfico, la distracción por el uso de dispositivos electrónicos y la desobediencia a señales de tránsito.

### ***2.1.3 Factores Socioeconómicos:***

Las desigualdades socioeconómicas muestran patrones consistentes en la accidentalidad, evidenciando una correlación entre factores estructurales y la distribución de víctimas. Ramos et al. [29] encontraron que el índice de concentración de mortalidad por accidentes de tránsito fue negativo en jurisdicciones con menor Índice de Desarrollo Humano (IDH), lo que indica una mayor carga de mortalidad en áreas de bajos recursos. Este patrón sugiere que la infraestructura deficiente y el acceso limitado a servicios de emergencia pueden influir en la letalidad de los accidentes.

Por otro lado, Murillo-Hoyos et al. [32] documentaron que el 82% de las víctimas mortales en accidentes de tránsito fueron hombres, con tasas más altas en departamentos con poblaciones entre 500,000 y 2,000,000 de habitantes. Este patrón sugiere una combinación de exposición al riesgo, comportamientos viales y acceso desigual a medidas de seguridad. Ambos estudios

refuerzan la existencia de desigualdades estructurales en la accidentalidad, lo que permite afirmar que estos patrones son consistentes en diferentes contextos.

Por su parte, Montenegro-Martínez et al. [30] identificaron que 38% de los peatones fallecidos no tenían seguro de salud. Los estudios de Ramos et al. [29] concluyen que las áreas de menor ingreso presentan mayor exposición a vehículos menos seguros e infraestructura vial deficiente.

#### ***2.1.4 Variables Demográficas:***

Roman-Lazarte et al. [31] encontraron que los adultos mayores requieren más rehabilitación post-accidente, mientras que Montenegro-Martínez et al. [30] reportan mayor mortalidad en peatones mayores de 60 años en áreas de alta densidad.

Respecto al género, Torres-Quintero et al. [1] documentaron mayor tendencia masculina hacia comportamientos de riesgo. Zamee et al. [33] encontraron menor percepción de seguridad en mujeres, mientras que Murillo-Hoyos et al. [32] confirmaron que 82% de víctimas mortales son hombres.

#### ***2.1.5 Estado Emocional y Percepción de Riesgo:***

Herrero-Fernández et al. [34] demostraron que los estados emocionales alteran significativamente la percepción del riesgo. Errázuriz [36] analizó cómo la normalización histórica del peligro en las calles ha llevado a comportamientos menos cautelosos.

Alonso et al. [3] encontraron que los conductores tienden a evaluar sus conductas como más seguras que las de otros, mientras que Figueroa-Tejada y Goñi [6] validaron una escala de desconexión moral que ayuda a comprender cómo los peatones justifican sus conductas riesgosas.

### 2.1.6 Factores Ambientales y Contextuales:

Toval-Ruiz et al. [28] identificaron que las áreas comerciales y turísticas son puntos críticos de accidentes, con un efecto paradójico donde las buenas condiciones viales pueden aumentar el riesgo (IRR 1.36).

Mejía López et al. [17] caracterizaron áreas críticas por infraestructuras dañadas, falta de sistemas de contención, señalización deficiente e iluminación inadecuada. Estos factores se ven agravados en zonas de alta densidad peatonal según Vásquez et al. [27].

**Tabla 1**

*Resumen de artículos relacionados a cada factor.*

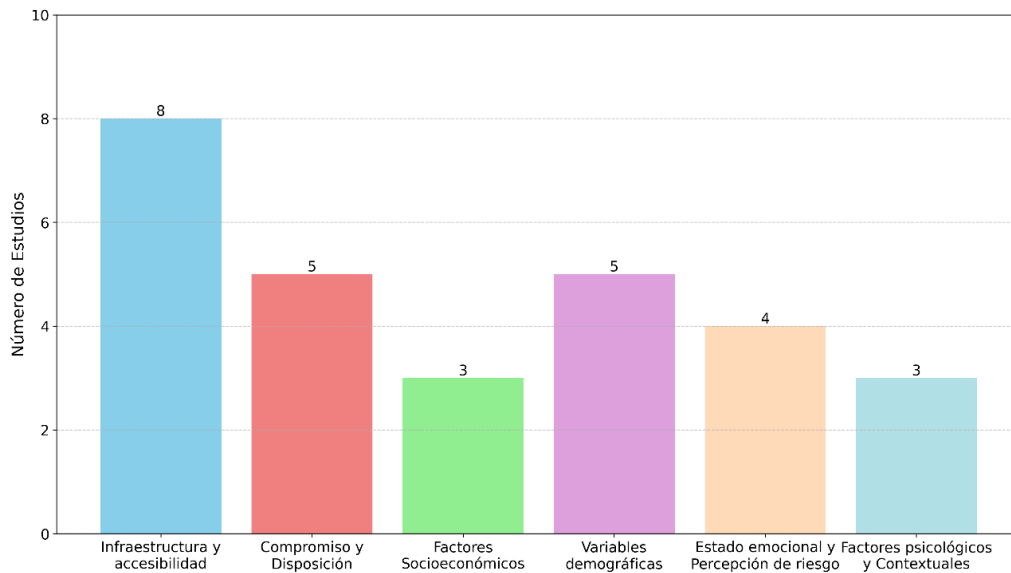
<b>Factor</b>	<b>Autor</b>
<b>Infraestructura y Accesibilidad</b>	Cárdenas-Cárdenas et al. [19]
	Navarro-Rosas y Obregón-Biosca [16]
	Soliz y Pérez-López [20]
	Andrade y Chaparro [21]
	Landa-Blanco y Ávila [24]
	Bando et al. [25]
<b>Comportamiento y Distracción</b>	Roza et al. [26]
	Zhang et al. [9]
	Wachnicka y Kulesza [7]
	Pešić et al. [8]
	Liu et al. [15]
<b>Factores Socioeconómicos</b>	Useche et al. [14]
	Ramos et al. [29]
<b>Factores Socioeconómicos</b>	Murillo-Hoyos et al. [32]
	Montenegro-Martínez et al. [30]
	Ramos et al. [29]
<b>Variables Demográficas</b>	Murillo-Hoyos et al. [32]
	Román-Lazarte et al. [31]
	Montenegro-Martínez et al. [30]
	Zamee et al. [33]
	Herrero-Fernández et al. [34]

<b>Estado Emocional y Percepción de Riesgo</b>	Errázuriz [36]
	Alonso et al. [3]
	Figueroa-Tejada y Goñi [6]
<b>Factores Ambientales y Contextuales</b>	Toval-Ruiz et al. [28]
	Vásquez et al. [27]
	Mejía López et al. [17]

*Nota.* Esta tabla muestra el resumen de artículos relacionados a cada factor identificado. Fuente: elaboración propia.

**Figura 1**

*Distribución de Estudios por Variables de Accidentalidad Peatonal.*



*Nota.* El gráfico representa la distribución de Estudios por Variables de Accidentalidad Peatonal. Fuente: elaboración propia.

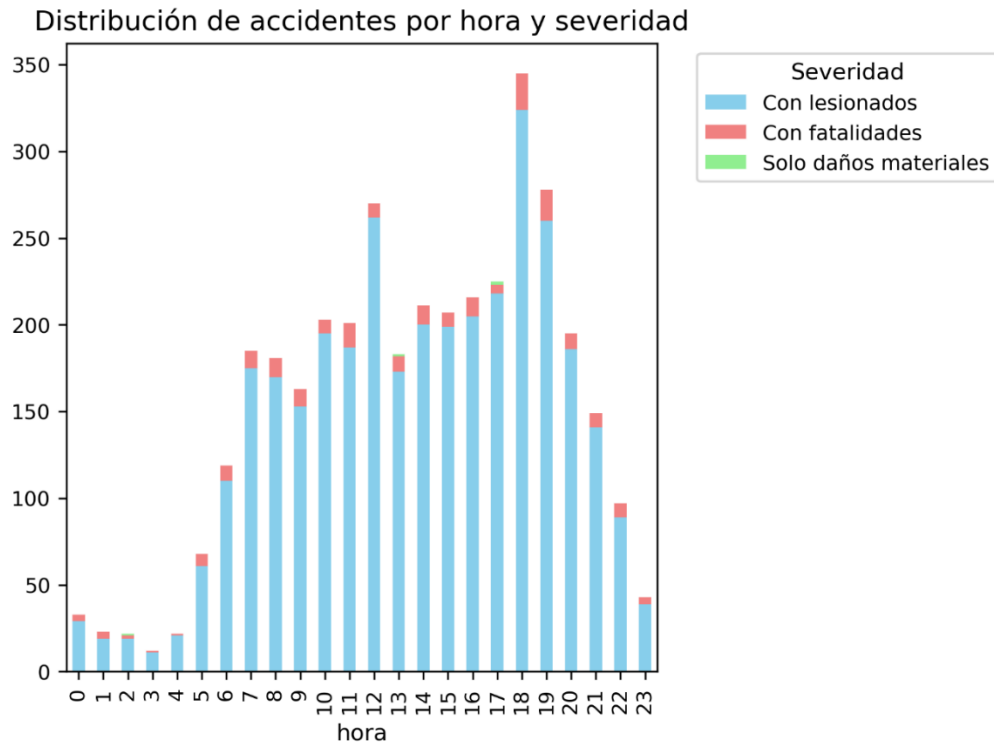
**2.2 Dimensión Temporal de la Accidentalidad**

El análisis temporal de la accidentalidad peatonal en Bucaramanga revela patrones significativos en su distribución horaria, semanal y mensual. Durante el día, se identifican tres

períodos críticos: el mediodía (12:00) concentra el 7.4% de los accidentes, mientras que las horas pico vespertinas (18:00-19:00) acumulan el 17.1% de los casos.

### Figura 2

*Distribución de accidentes por hora y severidad.*



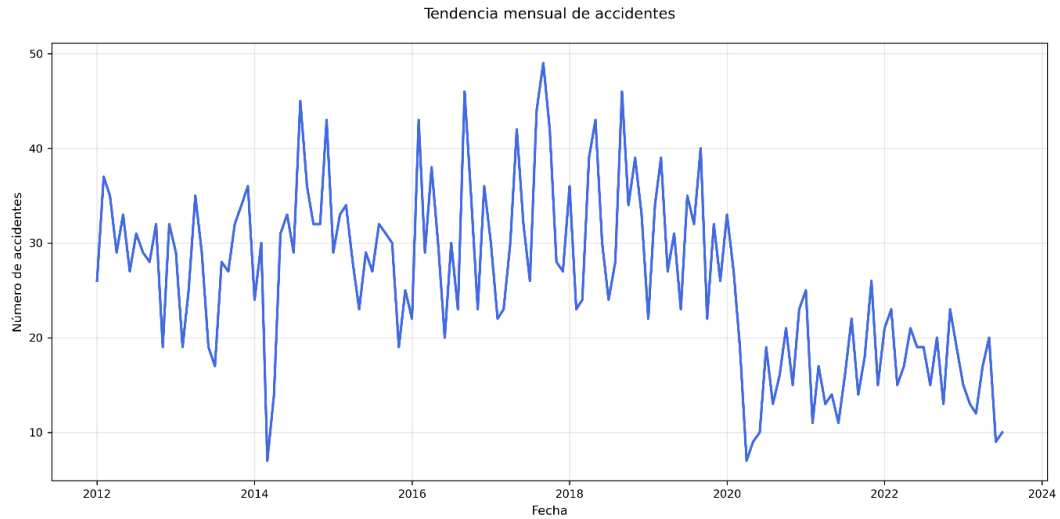
*Nota.* El gráfico representa la distribución de accidentes por hora y severidad. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la severidad, los incidentes con fatalidades presentan una media de 13.3 horas (1:20 PM), con una desviación estándar de  $\pm 5.9$  horas, mientras que los accidentes con lesionados se concentran alrededor de las 13.8 horas (1:48 PM), con una desviación estándar de  $\pm 5.1$  horas. Esta distribución sugiere una correlación entre la hora del día y la gravedad de los accidentes, posiblemente influenciada por factores como la visibilidad, el volumen de tráfico y el comportamiento tanto de conductores como de peatones.

La correlación observada se sustenta en varios aspectos clave. En primer lugar, los patrones horarios muestran que las horas pico vespertinas (18:00-19:00) concentran el 17.1% de los accidentes, coincidiendo con un aumento en la movilidad urbana y la congestión vehicular. Durante estas franjas, se observa una mayor participación de motocicletas en accidentes con lesionados (0.68 vehículos por incidente) y de vehículos pesados (camiones, buses) en casos fatales (8-10% de participación). Esta dinámica refleja un escenario de riesgo elevado debido a la combinación de alta densidad vehicular, maniobras imprudentes y limitada capacidad de reacción en zonas comerciales.

En segundo lugar, la distribución semanal muestra una concentración significativa durante los fines de semana, particularmente los sábados (16.8% de los casos) y viernes (15.5%), en contraste con los domingos, que registran la menor incidencia (10.4%). Este patrón sugiere una relación directa entre la actividad comercial y social de la ciudad y la frecuencia de accidentes peatonales. Los días con mayor actividad en zonas comerciales, como la Comuna 15 (Centro), presentan flujos peatonales intensos y una mayor exposición a interacciones peligrosas, especialmente en intersecciones con señalización deficiente.

Finalmente, la correlación inversa entre automóviles y motocicletas ( $\rho=-0.53$ ) sugiere que la competencia por el espacio vial en horas críticas incrementa la probabilidad de conflictos peatonales. Por ejemplo, mientras los automóviles predominan en accidentes con daños materiales (1.50 vehículos por caso), las motocicletas están sobrerrepresentadas en incidentes con lesionados (0.68 por caso), un patrón consistente con su alta flexibilidad de movimiento y frecuencia en zonas urbanas.

**Figura 3***Tendencia mensual de accidentes.*

*Nota.* El gráfico representa la tendencia mensual de accidentes. Fuente: elaboración propia.

A lo largo del período de estudio, la tendencia mensual exhibe variaciones notables, con una disminución significativa durante el año 2020, coincidiendo con las restricciones de movilidad impuestas por la pandemia de COVID-19. Esta reducción durante el confinamiento refuerza la relación directa entre el volumen de tráfico y la ocurrencia de accidentes. Fuera de este período atípico, septiembre registra la mayor concentración (9.8%), seguido por mayo (8.9%) y febrero y diciembre (ambos con 8.6%). Para un análisis más detallado de los patrones temporales, consultar los archivos anexos 03\_analisis\_temporal.pdf y 07\_analisis\_correlaciones.pdf.

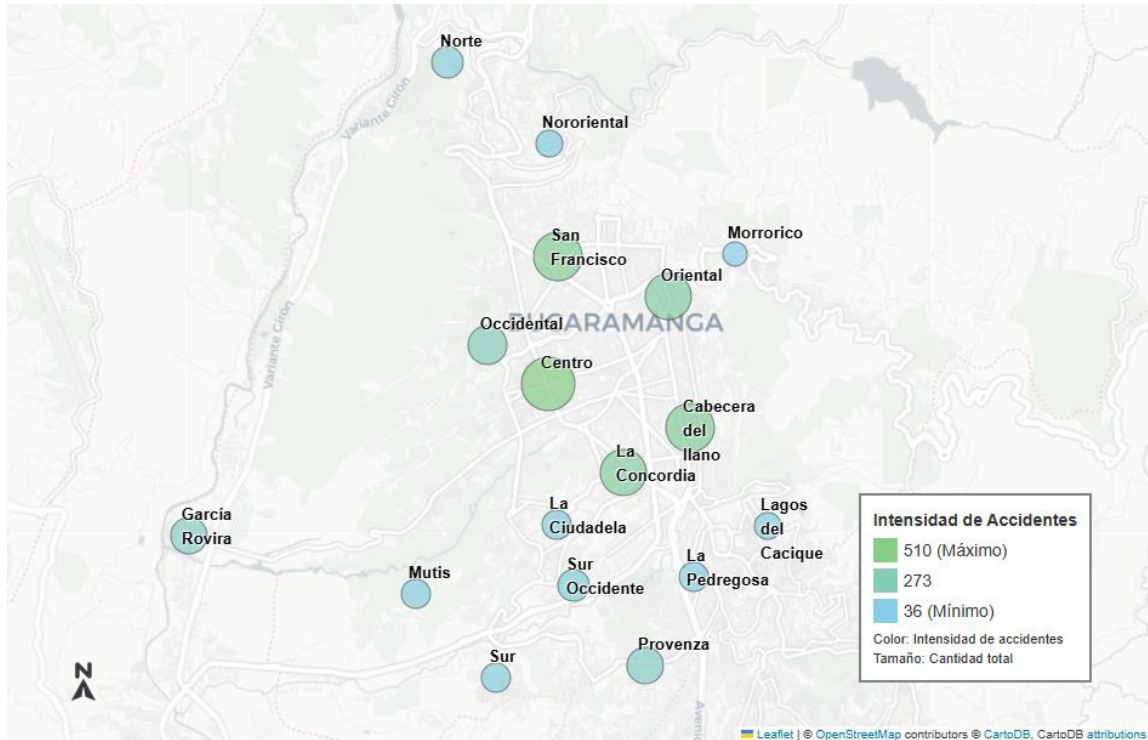
### ***2.2.1 Caracterización Espacial de los Accidentes***

La distribución espacial de los accidentes peatonales en Bucaramanga muestra una concentración significativa en determinadas áreas urbanas. La Comuna 15 (Centro) registra la mayor incidencia con 510 casos, representando el 14.0% del total de accidentes, seguida por la Comuna 3 (San Francisco) con 431 casos (11.8%) y la Comuna 12 (Cabecera del Llano) con 409

casos (11.2%). Este patrón de concentración refleja la relación directa entre la accidentalidad peatonal y las zonas de alta actividad comercial y flujo peatonal.

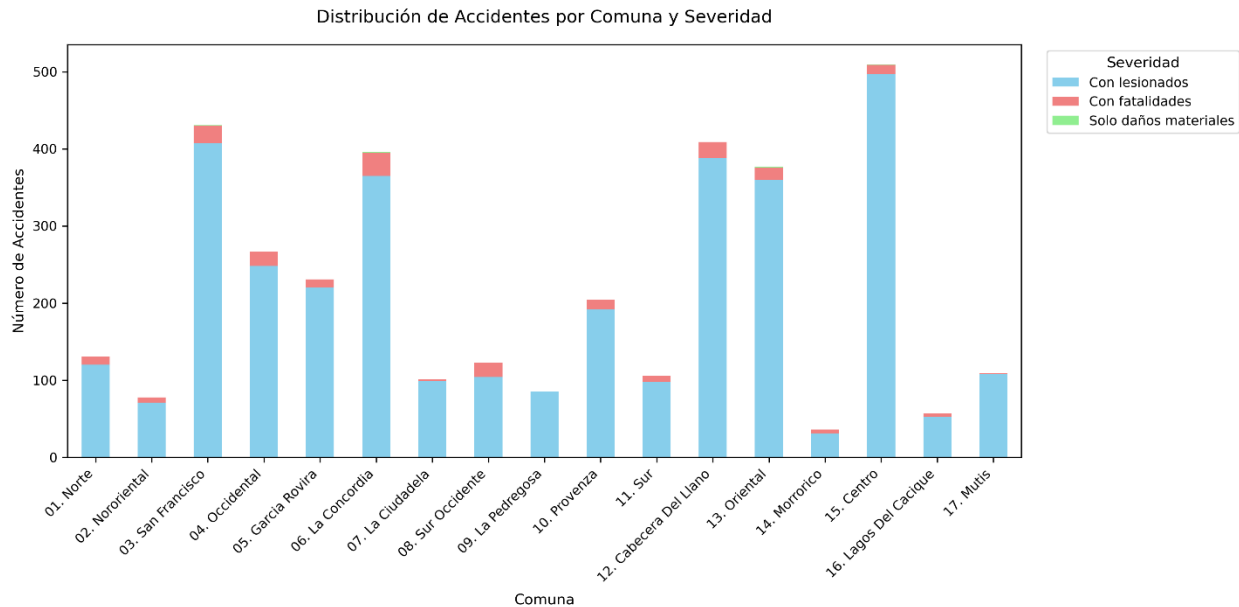
#### Figura 4

*Distribución espacial de accidentes peatonales en Bucaramanga por comuna (2012-2023).*



*Nota.* El gráfico representa la distribución espacial de accidentes peatonales en Bucaramanga por comuna (2012-2023). Fuente: elaboración propia.

No obstante, al analizar la severidad de los accidentes, emergen patrones diferentes. Si bien las comunas centrales concentran el mayor número de casos, son las comunas periféricas las que presentan proporciones más altas de accidentes fatales. Particularmente, la Comuna 8 (Sur Occidente) registra un 15.4% de casos fatales, mientras que la Comuna 14 (Morrórico) alcanza un 13.9%, cifras significativamente superiores al promedio de otras zonas.

**Figura 5***Distribución de Accidentes por Comuna y Severidad.*

*Nota.* El gráfico representa la Distribución de Accidentes por Comuna y Severidad. Fuente: elaboración propia.

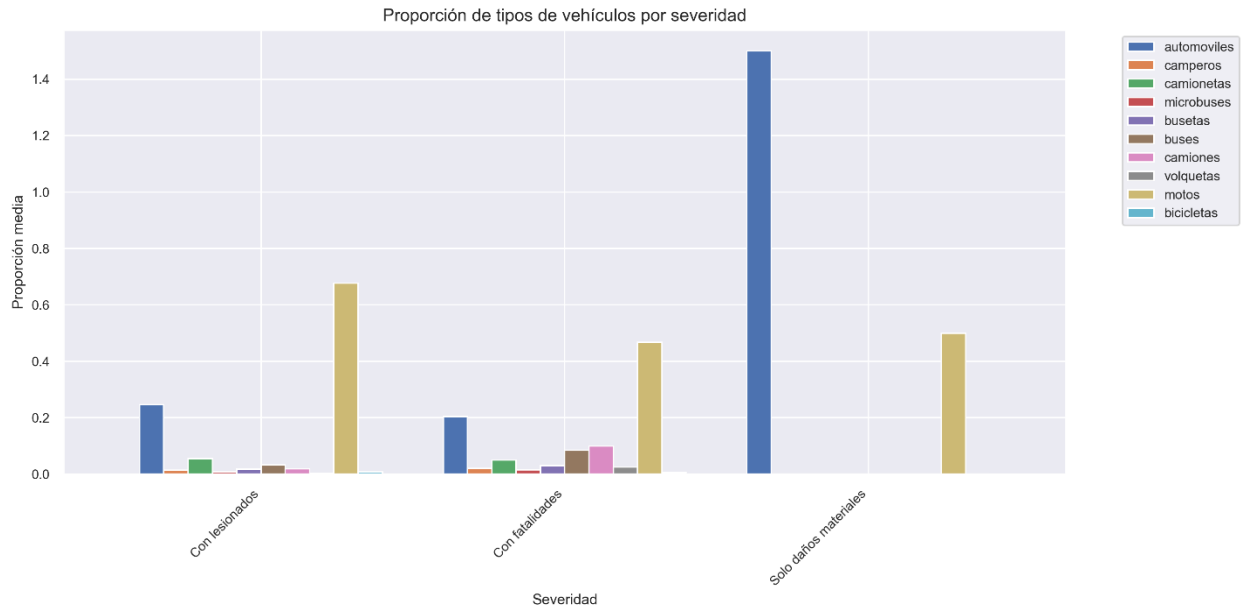
A nivel de infraestructura vial, las carreras concentran el 43.7% de los accidentes severos, seguidas por las calles con un 34.5%. Esta distribución sugiere una relación entre las características específicas de estas vías - como velocidad permitida, volumen de tráfico y presencia de cruces peatonales - y el riesgo de accidentes graves. Para un análisis más detallado de la distribución espacial, consultar el archivo '04\_analisis\_espacial.pdf'.

### 2.3 Incidencia del Componente Vehicular

El análisis del componente vehicular revela patrones distintivos tanto en frecuencia como en severidad. Las motocicletas muestran una participación predominante en accidentes con lesionados, con un promedio de 0.68 vehículos por accidente (2,332 casos), manteniendo una presencia significativa en accidentes fatales con 0.47 motocicletas por accidente (94 casos).

**Figura 6**

*Proporción media de tipos de vehículos por severidad.*



*Nota.* El gráfico representa la proporción media de tipos de vehículos por severidad. Fuente: elaboración propia.

En contraste, los automóviles presentan un patrón diferente, con una media de 0.25 vehículos por accidente con lesionados (847 casos) y 0.20 en accidentes fatales (41 casos). El análisis de correlaciones muestra una relación inversa significativa entre estos dos tipos de vehículos (coeficiente de correlación de -0.53), lo que indica que cuando aumenta la participación de uno, tiende a disminuir la del otro.

Los vehículos de mayor tamaño, aunque menos frecuentes en términos absolutos, presentan proporciones más altas de accidentes graves. Los buses registran un 8% de participación en accidentes fatales (17 casos), mientras que los camiones alcanzan un 10% (20 casos). Para profundizar en el análisis vehicular, consultar el archivo '06\_analisis\_vehiculos.pdf'.

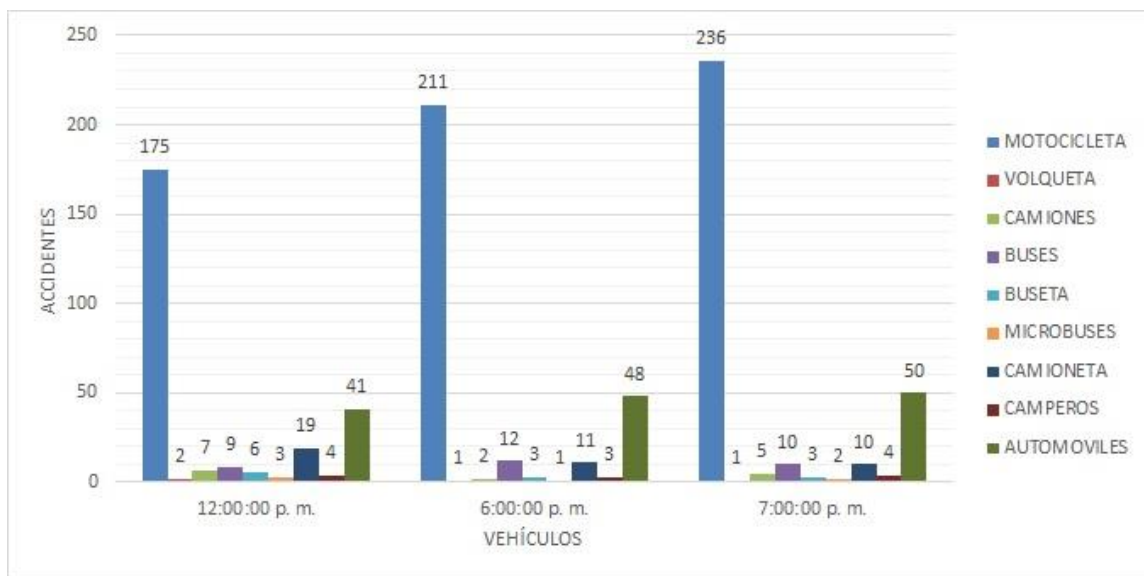
## 2.4 Priorización de Factores para la Intervención

La integración del análisis temporal, espacial y vehicular permite identificar los factores críticos que requieren atención prioritaria en el desarrollo de estrategias de intervención para la prevención de accidentes peatonales.

En el ámbito temporal, la concentración de accidentes durante las horas pico vespertinas (18:00-19:00), que acumulan el 17.1% de los casos, señala la necesidad de intervenciones específicas durante estas franjas horarias. Esta situación se intensifica particularmente los viernes y sábados, que en conjunto concentran el 32.3% de los accidentes, sugiriendo una relación directa con los patrones de movilidad asociados al fin de semana. Además, se subraya la importancia de que las medidas implementadas tengan un enfoque especial en motocicletas, debido a que estos vehículos son quienes mayor tasa de accidentalidad presentan.

**Figura 7**

*Accidentalidad registrada por los diferentes vehículos en las horas críticas.*



*Nota.* El gráfico representa la accidentalidad registrada por los diferentes vehículos en las horas críticas. Fuente: elaboración propia.

Desde la perspectiva espacial, si bien las comunas centrales (15, 3 y 12) agrupan el mayor volumen de accidentes, la distribución de severidad revela zonas críticas en la periferia. Las Comunas 8 y 14, con sus elevadas proporciones de fatalidades (15.4% y 13.9% respectivamente), demandan atención especial en términos de infraestructura y control vial. Este patrón se complementa con la identificación de las carreras como puntos críticos, concentrando el 43.7% de los accidentes severos.

En cuanto al componente vehicular, las motocicletas sobresalen como factor prioritario de intervención, especialmente durante las franjas horarias de mayor incidencia (18:00-20:00). Los vehículos de mayor tamaño, aunque menos frecuentes en los accidentes, muestran una correlación significativa con la severidad de estos, sugiriendo la necesidad de medidas específicas para este tipo de transporte en zonas de alta concentración peatonal.

### **3. Conclusiones**

Los resultados del análisis temporal, espacial y vehicular de la accidentalidad peatonal en Bucaramanga reflejan patrones consistentes con los hallazgos documentados en la revisión bibliográfica inicial, en este sentido, la comparación permite contextualizar los factores de riesgo locales dentro del marco más amplio de la literatura científica.

El estudio cumplió con su objetivo general al identificar los principales factores de riesgo asociados a la accidentalidad peatonal en Bucaramanga: (1) comportamiento de conductores y peatones (distracciones, velocidad, desobediencia a señales), (2) deficiencias en infraestructura vial (diseño de intersecciones, ausencia de cruces seguros), (3) desigualdades socioeconómicas (acceso limitado a servicios en zonas periféricas), y (4) factores psicológicos (percepción de riesgo,

normalización de conductas peligrosas). Sin embargo, la carencia de datos detallados sobre variables como uso de dispositivos móviles, condiciones climáticas y perfiles emocionales de los involucrados limitó la identificación integral de patrones causales, lo que subraya la necesidad de mejorar los sistemas de recolección de información.

El análisis temporal mostró que los accidentes peatonales se concentran en horas pico, especialmente durante la tarde (18:00-19:00) y el mediodía (12:00). Esto es consistente con los hallazgos de Velázquez Narváez et al. [2], quienes argumentaron que la falta de formación en seguridad vial, combinada con el aumento del tráfico en estas horas, incrementa la incidencia de comportamientos de riesgo. Asimismo, los estudios de Wang et al. [37] y Noh et al. [38] sobre el diseño de intersecciones enfatizan que factores como la visibilidad y el volumen vehicular afectan la seguridad en estas franjas horarias. La variación semanal también coincide con Ramos et al. [29] y Murillo-Hoyos et al. [32], quienes identificaron la relación entre la actividad comercial y social y el aumento de la accidentalidad, particularmente los fines de semana.

En términos espaciales, las comunas centrales de Bucaramanga, como la Comuna 15 (Centro), concentran el mayor número de accidentes, lo que está alineado con estudios como los de Soliz y Pérez-López [20] y Andrade y Chaparro [21], quienes destacaron la influencia de la actividad comercial y la alta densidad peatonal en zonas urbanas. Sin embargo, el hecho de que las comunas periféricas, como la Comuna 8 (Sur Occidente), presenten mayores proporciones de accidentes fatales, resalta la importancia de considerar factores socioeconómicos, como documentaron Ramos et al. [29] y Montenegro-Martínez et al. [30], al relacionar menores ingresos con deficiencias en infraestructura y acceso a sistemas de emergencia.

La distribución de accidentes según tipo de vía, con una mayor incidencia en carreras y calles, subraya la relevancia del diseño urbano en la seguridad vial, como lo señalaron Cárdenas-

Cárdenas et al. [19]. Las características específicas de estas vías, como la velocidad permitida y la ausencia de cruces peatonales seguros, parecen influir en la gravedad de los accidentes.

El análisis vehicular destaca la alta participación de motocicletas en accidentes con lesionados, un patrón que Velázquez Narváez et al. [2] relacionan con comportamientos de riesgo, como no respetar señales de tránsito y maniobras peligrosas. Además, la proporción significativa de vehículos de mayor tamaño, como camiones y buses, en accidentes fatales, coincide con lo documentado por Montenegro-Martínez et al. [30] y Zamee et al. [33], quienes identificaron una mayor severidad en accidentes que involucran este tipo de vehículos debido a su masa y velocidad.

En conjunto, estos hallazgos refuerzan la visión de la accidentalidad peatonal como un fenómeno multifactorial influenciado por variables de infraestructura, comportamiento, factores socioeconómicos y percepción del riesgo [2], [6], [29]. Además, la reducción observada durante el confinamiento de la pandemia en 2020 destaca la relación directa entre el volumen de tráfico y la ocurrencia de accidentes, como lo sugirieron Bando et al. [25] y Roza et al. [26].

Estos patrones subrayan la necesidad de intervenciones integrales que combinen mejoras en infraestructura, campañas educativas, regulación de comportamientos de riesgo y estrategias específicas para comunidades vulnerables. La integración de sistemas inteligentes y tecnologías emergentes podría complementar estos esfuerzos, tal como propusieron Wang et al. [37] y Noh et al. [38].

#### **4. Recomendaciones**

Basados en los hallazgos de esta investigación, se proponen las siguientes recomendaciones para la prevención y reducción de la accidentalidad peatonal en Bucaramanga:

#### **4.1 Mejora en la recolección y disponibilidad de datos:**

Implementar mejoras en la recolección sistemática de datos por parte de la Dirección de Tránsito, priorizando variables clave como el uso de dispositivos móviles al caminar, condiciones climáticas, estado emocional de los involucrados y accesibilidad para personas con discapacidad.

Garantizar el acceso público a los datos mediante plataformas digitales estandarizadas y actualizadas, facilitando su uso para investigación y políticas públicas.

Incorporar tecnologías de registro automatizado (cámaras térmicas, sensores de movimiento) para complementar los reportes manuales y reducir sesgos en la información.

#### **4.2 Intervenciones temporalmente diferenciadas:**

Implementar medidas específicas de control y vigilancia durante las horas pico vespertinas, especialmente en motocicletas, pues son quienes más se ven involucradas en accidentes en estos horarios.

Reforzar la seguridad vial durante fines de semana, especialmente en zonas de alta actividad comercial y social.

Adecuar los horarios de control vehicular según los patrones identificados de accidentalidad.

#### **4.3 Mejoras infraestructurales focalizadas:**

Priorizar la adecuación de infraestructura vial en comunas periféricas, especialmente en las Comunas 8 y 14.

Implementar mejoras en el diseño y señalización de carreras, considerando su alta incidencia en accidentes severos.

Desarrollar intervenciones específicas para zonas de alta concentración comercial.

#### **4.4 Control vehicular específico:**

Establecer medidas especiales para motocicletas en zonas y horarios de alta concentración peatonal.

Implementar restricciones de circulación para vehículos de carga en áreas de alto flujo peatonal.

Desarrollar programas de sensibilización dirigidos a conductores de vehículos de gran tamaño.

#### **4.5 Equidad en la seguridad vial:**

Priorizar la inversión en infraestructura de seguridad vial en zonas periféricas.

Mejorar los tiempos de respuesta a emergencias en áreas con mayor incidencia de accidentes fatales.

Implementar programas de educación vial adaptados a las características específicas de cada zona.

**Referencias Bibliográficas**

- Alonso, F., Esteban, C., Faus, M., & Useche, S. A. (2019). Road risk behaviors: Pedestrian experiences. *Traffic Injury Prevention*, 20(3), 303-307. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15389588.2019.1573318>
- Andrade Ochoa, S., & Chaparro Gómez, V. I. (2022). Relación cuantitativa entre atropellamientos y puentes peatonales en Chihuahua, México. *Revista INVI*, 37(106), 121–148. <https://doi.org/10.5354/0718-8358.2022.67149>
- Alsaleh, R., Sayed, T., & Zaki, M. H. (2018). Assessing the effect of pedestrians' use of cell phones on their walking behavior: A study based on automated video analysis. *Transportation Research Record*, 2672(35), 46-57. <https://doi.org/10.1177/0361198118780708>
- Bando, Y., Yoh, K., Sou, K., Chou, C.-C., & Doi, K. (2023). AI-based evaluation of streets for people in Bangkok: Perspectives from walkability and lingering. *Sustainability*, 15(24), 16884. <https://doi.org/10.3390/su152416884>
- Cárdenas-Cárdenas, L. M., Barrientos Gutiérrez, T., Quistberg, D. A., et al. (2023). One-year impact of a multicomponent, street-level design intervention in Mexico City on pedestrian crashes: A quasi-experimental study. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 77(3), 140-146. <https://doi.org/10.1136/jech-2022-219335>
- Escobar, D. A., Cardona, S., & Hernández-Pulgarín, G. (2021). Risky pedestrian behaviour and its relationship with road infrastructure and age group: An observational analysis. *Safety Science*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105418>
- Errázuriz, T. (2018). ¡Tenga Ud. cuidado! El peligro como fundamento para la normalización del uso de las calles en Santiago (1900-1930). *Historia Contemporánea*, 56, 69-98. <https://ojs.ehu.eus/index.php/HC/article/view/20552/19782>

- Figueroa-Tejada, G., & Goñi, N. (2023). Pedestrian moral disengagement scale towards sustainable urban planning. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100936>
- Herrero-Fernández, D., Parada-Fernández, P., Oliva-Macías, M., & Jorge, R. (2020). The influence of emotional state on risk perception in pedestrians: A psychophysiological approach. *Safety Science*, 130, 104857. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104857>
- Karolemeas, C., Mitropoulos, L., Koliou, K., Tzamakos, D., Stavropoulou, E., Moschou, E., & Kepaptsoglou, K. (2023). A systematic literature review on health benefits, incentives, and applications to promote walking in urban areas. *Future Transportation*, 3(4), 1385-1400. <https://doi.org/10.3390/futuretransp3040076>
- Landa-Blanco, M., & Ávila, J. (2020). Factors related to the use of pedestrian bridges in university students of Honduras. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 71, 220-228. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.04.016>
- Liu, J., Jones, S., Adanu, E. K., & Li, X. (2021). Behavioral pathways in bicycle-motor vehicle crashes: From contributing factors, pre-crash actions, to injury severities. *Journal of Safety Research*, 77, 229-240. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2021.02.015>
- Li, W., & Liu, J. (2023). Analysis of the evolution of pedestrian crossing based on dynamic penalty mechanism. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 623, 128844. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.128844>
- Lozano Domínguez, J. M., Redondo González, M. J., Davila Martin, J. M., & Mateo Sanguino, T. de J. (2023). Using sensor fusion and machine learning to distinguish pedestrians in artificial intelligence-enhanced crosswalks. *Electronics*, 12(23), 4718. <https://doi.org/10.3390/electronics12234718>

- Makalew, F. P., Adisasmita, S. A., Wunas, S., & Hamid, S. (2017). Influence of children pedestrian behaviour on pedestrian space usage. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 271(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012028>
- Mejía, R., Quinteros, E., & Ribó Arnau, A. (2023). Áreas geográficas con mayor concentración de accidentes de tránsito en San Salvador, El Salvador: un análisis espacial del período 2014-2018. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 40(4), 413-422. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2023.404.12963>
- Montealegre Quijano, J. L., & Garzón Quiroga, J. A. (2021). Puntos críticos de accidentes de tránsito en Ibagué, Colombia. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 36(2), 673–715. <https://doi.org/10.24201/edu.v36i2.2035>
- Montenegro-Martínez, G., Agudelo-Cifuentes, M.-C., & Muñoz-Rodríguez, D.-I. (2023). Mortality due to traffic accidents in Colombia: Profiles of pedestrians and cyclists, 1998-2019. *F1000Research*, 12, 360. <https://doi.org/10.12688/f1000research.131431.2>
- Murillo-Hoyos, J., García-Moreno, L. M., Tinjacá, N., & Jaramillo, C. (2023). Mortalidad por lesiones de tránsito y desigualdades sociales en Colombia, 2019. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 47, e121. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2023.121>
- Navarro-Rosas, A. A., & Obregón-Biosca, S. A. (2022). Pedestrian behavior in signalized intersections: Santiago de Querétaro. *Journal of Transport & Health*, 26, 101414. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2022.101414>
- Noh, B., Park, H., Lee, S., & Nam, S.-H. (2022). Vision-based pedestrian's crossing risky behavior extraction and analysis for intelligent mobility safety system. *Sensors*, 22(9), 3451. <https://doi.org/10.3390/s22093451>

- Pešić, D., Antić, B., Glavić, D., & Milenković, M. (2016). The effects of mobile phone use on pedestrian crossing behaviour at unsignalized intersections – Models for predicting unsafe pedestrians behaviour. *Safety Science*, 82, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.08.016>
- Putranto, L. S., & Ananda, F. R. (2023). The development of Indonesian pedestrian behaviour questionnaire. *AIP Conference Proceedings*, 2680(1), 020015. <https://doi.org/10.1063/5.0126203>
- Ramos, G., Elorza, M. E., & Moscoso, N. S. (2024). Desigualdades sociales en la mortalidad por lesiones de tránsito: Un estudio ecológico en las provincias de Argentina. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 42, e354694. <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.e354694>
- Roman-Lazarte, V., Roman, L. A., & Chavez-Bustamante, S. G. (2023). Factores asociados al requerimiento de rehabilitación física en los peatones sobrevivientes de atropello en Perú, 2016 - 2021. *Anales de la Facultad de Medicina*, 84(3), 272-278. <https://doi.org/10.15381/anales.v84i3.24960>
- Roza, A., Mulyani, S., Rusli, A. M., & Muchlisin. (2021). Percepciones peatonales y la nueva normalidad: Un estudio de caso en Jalan Khatib Sulaiman, Padang. *Proceedings of the 4th International Conference on Sustainable Innovation 2020–Technology, Engineering and Agriculture (ICoSITEA 2020)*, *Advances in Engineering Research*, 204, 32-37. <https://doi.org/10.2991/aer.k.210204.007>
- Saxena, A. (2017). Pedestrian safety at intersections: A study on factors influencing gap acceptance and crossing decisions. *Transportation Research Procedia*, 25, 4645-4655.
- Soliz, A., & Pérez-López, R. (2022). ‘Footbridges’: Pedestrian infrastructure or urban barrier? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 55, 101161. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101161>

- Tanikawa-Obregón, K., & Paz-Gómez, D. M. (2021). El peatón como base de una movilidad urbana sostenible en Latinoamérica: Una visión para construir ciudades del futuro. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 50, 33-38. <https://doi.org/10.15446/rbct.n50.94842>
- Toval-Ruiz, C., Rojas-Roque, C., & Hernández-Vásquez, A. (2021). Predictors and geographic analysis of road traffic accidents in Leon, Nicaragua. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, 24, e210003. <https://doi.org/10.1590/1980-549720210003>
- Torres-Quintero, A., Palacios-Doncel, D. L., Dominguez-Torres, M. T., Gáfarro-Barrera, M. E., & Burbano-Valente, J. (2019). Masculinities at play. A sociocultural approach to the practices of risky riding among male motorcyclists in Valledupar, Colombia. *Journal of Transport & Health*, 14, 100599. [https://www.safeylit.org/citations/index.php?fuseaction=citations.viewdetails&citationId\[s\]=citjournalarticle\\_629898\\_13](https://www.safeylit.org/citations/index.php?fuseaction=citations.viewdetails&citationId[s]=citjournalarticle_629898_13)
- Useche, S. A., Alonso, F., & Montoro, L. (2019). Validation of the Walking Behavior Questionnaire (WBQ): A tool for measuring risky and safe walking under a behavioral perspective. *Journal of Transport & Health*, 12, 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2020.100899>
- Useche, S. A., Alonso, F., Boyko, A., et al. (2022). Cross-culturally approaching the cycling behaviour questionnaire (CBQ): Evidence from 19 countries. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 91, 218-230. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2022.10.025>
- Velázquez Narváez, Y., Parra Sierra, V., Peña Cárdenas, F., Ruíz Ramos, L., Zamorano González, B., Vargas Martínez, J. I., & Monreal Aranda, O. (2019). Road risk behaviors: Pedestrian

experiences. *Traffic Injury Prevention*, 20(3), 303-307.

<https://doi.org/10.1080/15389588.2019.1573318>

Vásquez, D., Castro, J., Silvera, M., & Campos, F. (2020). Influencia de los parámetros del modelo de fuerza social en el análisis de la capacidad en espacios públicos para personas con movilidad reducida. 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology. [https://laccei.org/LACCEI2020-VirtualEdition/full\\_papers/FP545.pdf](https://laccei.org/LACCEI2020-VirtualEdition/full_papers/FP545.pdf)

Wachnicka, J., & Kulesza, K. (2020). Does the use of cell phones and headphones at the signalised pedestrian crossings increase the risk of accident? *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 15(4), 96-108. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2020-15.496>

Wang, Z., Peng, P., Geng, K., Cheng, X., Zhu, X., Chen, J., & Yin, G. (2023). Analysis of pedestrian crossing behavior based on Centralized Unscented Kalman Filter and pedestrian awareness-based social force model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 632, 129350. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.129350>

Zamee, A. I., Islam, S., Azad, I. I., Tomal, R. S., & Murshed, M. N. (2022). Major pedestrian safety concerns in Bangladesh: A survey on the safety issues and pedestrian behavior analysis. 6th International Conference on Advances in Civil Engineering (ICACE-2022), Chattogram, Bangladesh. <https://www.researchgate.net/publication/369170692>

Zhang, H., Zhang, C., Chen, F., & Wei, Y. (2019). Effects of mobile phone use on pedestrian crossing behavior and safety at unsignalized intersections. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 46(5), 381-388. <https://doi.org/10.1139/cjce-2017-0649>

Zhang, Y., Zhang, Y., Wang, Y., Zhang, Y., & Li, Y. (2022). Analysis of behavior characteristics for pedestrian twice-crossing at signalized intersections based on an improved social force model. *Sustainability*, 14(4), 2003. <https://doi.org/10.3390/su14042003>