Propuesta de estrategias para la implementación de vigilancia mediante drones que permitan mejorar la gestión del tráfico vehicular en Medellín

Jhonny Alexander Metaute

Sara Lorduy Hernández

Monografía

Modalidad de grado

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

Medellín, Colombia

28 de junio de 2026

Contenido

Contenido 1
Lista de tablas 4
Lista de figuras 5
Lista de anexos 6
Resumen 7
Abstract 9
Introducción 11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 14
1.1 Descripción del problema 14
1.1.1 Contexto internacional y nacional 14
1.1.2 Contexto local: la movilidad en Medellín 15
1.2 La pregunta de investigación 16
1.3 Los objetivos de investigación 16
1.3.1 Objetivo general 17
1.3.2 Objetivos específicos 17
1.4 Justificación de la investigación 17
1.4.1 Justificación académica y científica 17
1.4.2 Justificación social 18
2. MARCO DE REFERENCIA 20
2.1 Marco de Antecedentes 20
Antecedente 1: Kanistras et al. (2015) 20
Antecedente 2: Khan et al. (2017) 21
Antecedente 3: Coifman et al. (2018) 21
Antecedente 4: Outay et al. (2020) 21
Antecedente 5: Barmpounakis y Geroliminis (2020) 22
Antecedente 6: Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá (2020) 22
Antecedente 7: Zapata y Ortiz (2021) 23
Antecedente 8: Bisio et al. (2022) 23
Antecedente 9: Castro et al. (2022) 23
Antecedente 10: Liu et al. (2023) 24
Antecedente 11: Agencia Nacional de Contratación Pública (2025) 24

Antecedente 12: TomTom Traffic Index (2025) 25
2.2 Marco Teórico 25
2.2.1 Gerencia de proyectos en el sector público 25
2.2.2 Movilidad urbana inteligente 25
2.2.3 Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) 26
2.2.4 Sistemas de Aeronaves No Tripuladas (UAS / UAV / Drones) 26
2.2.5 Gestión del tráfico y atención de incidentes viales 27
2.2.6 Ciudades inteligentes (Smart Cities) 27
2.2.7 Análisis comparativo y transferencia de buenas prácticas 27
2.3 Marco normativo 28
3. METODOLOGÍA 31
3.1 Enfoque de la investigación 31
3.1.1 Alcance 31
3.2 Población y muestra 32
3.2.1 Definición de la población 32
3.2.2 Cálculo y selección de la muestra 33
3.3 Instrumentos 33
3.3.1 Guía de revisión documental y matriz de análisis comparativo 34
3.3.2 Guía de entrevista semiestructurada 34
3.4 Descripción de procedimientos 35
3.5 Análisis de información 35
3.6 Consideraciones éticas 36
3.6.1 Análisis de consideraciones éticas 36
3.6.2 Instrumentos de aceptación y autorización 37
4. HIPÓTESIS 38
4.1 Las variables 38
4.1.1 Variable independiente 38
4.1.2 Variables dependientes 38
4.2 Planteamiento de hipótesis 39
5. RESULTADOS 41
5.1 Presentación de resultados 41
5.1.1 Matriz de revisión documental 41
5.1.2 Matriz comparativa de indicadores Medellín–Bogotá 43
5.1.3 Análisis estadístico de los indicadores en JASP 44

5.1.4 Resultados de las entrevistas semiestructuradas 46
5.1.5 Articulación de los resultados con los objetivos 51
5.2 Propuesta al sector 53
Estrategia 1 – Marco normativo local 53
Estrategia 2 – Dimensionamiento técnico de la flota 54
Estrategia 3 – Modelo operativo articulado con el SIMM 54
Estrategia 4 – Plan de capacitación 55
Estrategia 5 – Mecanismos de evaluación basados en indicadores 56
6. DISCUSIÓN 58
7. CONCLUSIONES 60
8. RECOMENDACIONES 62
Referencias 64
Anexos 70
Anexo A. Formato de Consentimiento Informado 70
Anexo B. Guía de Entrevista Semiestructurada 70
Bloque 1. Perfil y vinculación institucional 70
Bloque 2. Diagnóstico institucional del estado actual 71
Bloque 3. Expectativas sobre el uso de drones 71
Bloque 4. Recomendaciones para la implementación 71

Lista de tablas

Tabla 1. Matriz de revisión documental (corpus de conocimiento)

Tabla 2. Matriz comparativa de indicadores de movilidad – Medellín y Bogotá

Tabla 3. Estadística descriptiva de los indicadores clave por ciudad y escenario

Tabla 4. Resultados de las pruebas de comparación de medias e indicadores de tamaño del efecto

Tabla 5 a Tabla 18. Matrices de resultados de la entrevista semiestructurada (preguntas 1 a 14)

Tabla 19. Síntesis de categorías temáticas del análisis cualitativo

Lista de figuras

Figura 1. Comparación del tiempo promedio de respuesta ante incidentes viales

Lista de anexos

Anexo A. Formato de Consentimiento Informado

Anexo B. Guía de Entrevista Semiestructurada

Resumen

La gestión del tráfico vehicular en Medellín enfrenta desafíos crecientes relacionados con la congestión en hora pico, los tiempos prolongados de respuesta ante incidentes viales y las limitaciones de cobertura del sistema institucional de monitoreo. Aunque la Secretaría de Movilidad cuenta con un Sistema Inteligente de Movilidad (SIMM) que integra cámaras CCTV y lectores ARS, su cobertura es predominantemente fija y no permite atención dinámica de eventos. Ante este escenario, el presente trabajo se propone formular una propuesta con estrategias para la implementación de vigilancia mediante drones que mejore la gestión del tráfico vehicular en Medellín, tomando como referencia la experiencia de Bogotá.

La investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto de tipo descriptivo-comparativo, con un diseño no experimental transversal. Como instrumentos se emplean una matriz de análisis documental para sistematizar datos secundarios oficiales de las dos ciudades, una entrevista semiestructurada dirigida a funcionarios de la Secretaría de Movilidad y una guía de revisión bibliográfica. El análisis cuantitativo de los indicadores (tiempos de respuesta, velocidad promedio y frecuencia de congestión) se realiza con el software JASP mediante estadística descriptiva y pruebas de comparación de medias; el análisis cualitativo se desarrolla mediante codificación temática.

Los resultados evidencian que la experiencia bogotana redujo los tiempos de respuesta a choques simples de aproximadamente 20 a 7 minutos (–65%) y mejoró la velocidad promedio en hora pico cerca de un 22%. En Medellín, los tiempos actuales oscilan entre 22 y 29 minutos y la velocidad en hora pico se sitúa entre 13,9 y 19,1 km/h, con niveles de congestión del 66,9% en promedio. A partir de estos hallazgos, se formula una propuesta con cinco estrategias: marco normativo local, dimensionamiento técnico de la flota, modelo operativo articulado con el SIMM,

plan de capacitación y mecanismos de evaluación basados en indicadores. Se concluye que la implementación de drones es técnica, legal y operativamente factible, y representa un complemento al sistema actual con potencial de mejora superior al 30% en los indicadores clave.

Palabras clave: Drones, gestión del tráfico, movilidad urbana, gerencia de proyectos, Medellín, sistemas inteligentes de transporte.

Abstract

Traffic management in Medellín faces growing challenges related to peak-hour congestion, long response times to road incidents, and limited coverage of the institutional monitoring system. Although the Department of Mobility operates an Intelligent Mobility System (SIMM) integrating CCTV cameras and ARS readers, its coverage is mostly fixed and does not allow dynamic event response. In this context, the present work aims to formulate a proposal with strategies for the implementation of drone-based surveillance to improve traffic management in Medellín, using Bogotá's experience as a reference.

The research follows a mixed-methods, descriptive-comparative approach with a non-experimental cross-sectional design. The instruments used are a documentary analysis matrix to systematize official secondary data from both cities, a semi-structured interview directed at officials of the Department of Mobility, and a bibliographic review guide. Quantitative analysis of indicators (response times, average speed, and congestion frequency) is conducted using JASP software through descriptive statistics and mean-comparison tests; qualitative analysis follows thematic coding.

Results show that Bogotá's experience reduced response times to simple crashes from approximately 20 to 7 minutes (–65%) and improved peak-hour average speed by about 22%. In Medellín, current response times range from 22 to 29 minutes and peak-hour speeds are between 13.9 and 19.1 km/h, with congestion levels averaging 66.9%. Based on these findings, a proposal is formulated with five strategies: local regulatory framework, technical fleet sizing, operational model linked to SIMM, training plan, and indicator-based evaluation mechanisms. The study concludes that drone implementation is technically, legally, and operationally feasible and

represents a complement to the current system with potential improvements above 30% in key indicators.

Keywords: Drones, traffic management, urban mobility, project management, Medellín, intelligent transportation systems.

Introducción

La movilidad urbana constituye uno de los principales desafíos contemporáneos para las ciudades en crecimiento. La congestión vehicular, los tiempos prolongados de respuesta ante incidentes y la limitada capacidad institucional para gestionar el tráfico en tiempo real afectan no solo la productividad económica, sino también la calidad de vida, la seguridad vial y la sostenibilidad ambiental de los entornos urbanos. De acuerdo con TomTom (2025), Medellín registra niveles de congestión promedio del 66,9% y velocidades promedio en hora pico que oscilan entre 13,9 y 19,1 km/h, lo que ubica a la ciudad entre las más afectadas por congestión vehicular en América Latina.

Frente a este panorama, los sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS o drones, por sus siglas en inglés) han emergido como una tecnología disruptiva con potencial para complementar los sistemas tradicionales de monitoreo vial. Diversos estudios y experiencias internacionales demuestran que los drones permiten ampliar la cobertura geográfica, reducir los tiempos de respuesta ante incidentes y proveer información en tiempo real para la toma de decisiones operativas (Outay et al., 2020). Esta integración tecnológica se enmarca en el paradigma de las ciudades inteligentes (smart cities) y de los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), que conciben la movilidad como un sistema sociotécnico complejo gestionado mediante información oportuna y articulación institucional (UN-Habitat, 2020).

En el contexto colombiano, la Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá ha sido pionera en la incorporación de drones para la atención de incidentes viales, logrando reducir los tiempos de respuesta a choques simples de aproximadamente 20 minutos a 7 minutos (Secretaría Distrital de Movilidad, 2020). En contraste, la Secretaría de Movilidad de Medellín cuenta con un Sistema Inteligente de Movilidad (SIMM) basado principalmente en cámaras CCTV y sensores fijos

(SIMM, 2024), y ha iniciado un proceso de contratación para incorporar UAS como apoyo a la captura de información en vía (Agencia Nacional de Contratación Pública, 2025), aunque sin contar todavía con un modelo operativo consolidado, lineamientos normativos locales ni indicadores de seguimiento.

La presente monografía aborda esta brecha mediante la formulación de una propuesta con estrategias para la implementación de vigilancia con drones por parte de la Secretaría de Movilidad de Medellín. La propuesta se construye desde un enfoque mixto que articula la sistematización de datos secundarios oficiales de Medellín y Bogotá, el análisis comparativo de indicadores clave de movilidad y la consulta a actores institucionales, con el fin de identificar buenas prácticas, capacidades técnicas requeridas, condiciones normativas y rutas de implementación viables para el contexto local.

El documento se organiza siguiendo el formato de trabajo de grado establecido por la Corporación Universitaria Minuto de Dios. El primer capítulo presenta el planteamiento del problema, incluyendo la descripción de causas y factores a nivel internacional, nacional y local, la pregunta de investigación, los objetivos y la justificación académica, científica y social del proyecto. El segundo capítulo desarrolla el marco de referencia, articulado en marco de antecedentes (con revisión sistemática de 12 trabajos previos), marco teórico (siete ejes conceptuales) y marco normativo (instrumentos jurídicos aplicables). El tercer capítulo describe la metodología, especificando el enfoque, el alcance, la población y muestra, los instrumentos, los procedimientos, el análisis de información mediante JASP y las consideraciones éticas. El cuarto capítulo formula las variables y las hipótesis de la investigación. El quinto capítulo, eje central del trabajo, presenta en el apartado 5.1 los resultados —la matriz de revisión documental, la matriz comparativa de indicadores entre Medellín y Bogotá, el análisis estadístico, los resultados de las

entrevistas y la articulación de los hallazgos con los objetivos— y en el apartado 5.2 la propuesta al sector con las estrategias formuladas. El sexto capítulo desarrolla la discusión, contrastando los hallazgos con la literatura de antecedentes. El séptimo capítulo expone las conclusiones —al menos una por cada objetivo, una asociada a los resultados y una referida a la propuesta— y el octavo las recomendaciones. El documento cierra con las referencias en formato APA 7.ª edición y los anexos correspondientes.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

1.1.1 Contexto internacional y nacional

La movilidad urbana se ha consolidado como uno de los principales retos estructurales que enfrentan las ciudades en el siglo XXI. A nivel internacional, la creciente urbanización ha intensificado los problemas de congestión vehicular, contaminación atmosférica y siniestralidad vial, generando impactos significativos sobre la economía y la salud pública. Según el reporte global de TomTom Traffic Index (2025), ciudades como Bangkok, Estambul y Bogotá registran niveles de congestión superiores al 60%, lo que implica que los conductores invierten en promedio entre 100 y 150 horas adicionales al año atrapados en el tráfico. La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2023) reporta a su vez que los accidentes de tránsito ocasionan cerca de 1,19 millones de muertes anuales en el mundo, posicionándolos como la principal causa de muerte para personas entre 5 y 29 años. En este contexto, la incorporación de tecnologías emergentes —entre ellas los sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS o drones)— ha sido identificada como una alternativa para fortalecer las capacidades de monitoreo, vigilancia y gestión vial (Outay et al., 2020).

Países como España, Emiratos Árabes Unidos y Estados Unidos han incorporado drones en operaciones de gestión del tráfico, con resultados positivos en reducción de tiempos de respuesta y atención de eventos viales. En América Latina, Ciudad de México y Santiago de Chile han desarrollado pilotos para vigilancia aérea del tráfico urbano, evidenciando mejoras en cobertura operativa y atención de incidentes en zonas críticas (UN-Habitat, 2020). Estas experiencias demuestran que los drones, articulados con plataformas de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), pueden generar información en tiempo real con un costo operativo significativamente menor al de los sistemas tradicionales basados en infraestructura fija.

En el contexto colombiano, la situación de la movilidad urbana se ha agudizado en las últimas décadas como consecuencia del aumento del parque automotor, la expansión urbana desordenada y las limitaciones presupuestales para la modernización de la infraestructura vial. El Ministerio de Transporte (2023) reporta que el país superó los 18 millones de vehículos registrados, con un crecimiento anual cercano al 5%. La Agencia Nacional de Seguridad Vial (2023) documenta más de 7.000 fallecimientos anuales por siniestros viales, una cifra que ubica a Colombia entre los países con mayor mortalidad vial de la región. Frente a este panorama, las principales ciudades del país han comenzado a implementar Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) para mejorar la gestión vial, aunque con niveles de desarrollo dispares. Bogotá ha sido pionera en la integración de drones para la atención de incidentes desde 2017, logrando reducir el tiempo de despacho de los agentes de tránsito de 28 a 10 minutos en promedio (El Tiempo, 2017; Secretaría Distrital de Movilidad, 2020).

1.1.2 Contexto local: la movilidad en Medellín

En el ámbito local, Medellín presenta una problemática crítica de movilidad que afecta directamente la calidad de vida de los más de 2,6 millones de habitantes del Valle de Aburrá. De acuerdo con TomTom (2025), la ciudad registra una velocidad promedio en hora pico de entre 13,9 y 19,1 km/h, con niveles de congestión que oscilan en torno al 66,9% en promedio y picos del 139% en hora pico vespertina. Los reportes de Telemedellín (2024) y de la Secretaría de Movilidad de Medellín (2023a) muestran que los tiempos promedio de respuesta ante incidentes viales se encuentran entre 22 y 29 minutos, cifra significativamente superior a la registrada por Bogotá tras la implementación de drones. A su vez, el Sistema Inteligente de Movilidad de Medellín (SIMM, 2024) reporta que la cobertura de monitoreo en tiempo real se realiza principalmente mediante cámaras CCTV fijas y sensores ARS, lo que limita la atención dinámica de eventos en zonas no cubiertas por la infraestructura instalada.

Adicionalmente, la Encuesta Origen-Destino del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA, 2022) reporta que el 38% de los viajes diarios en la ciudad se realizan en vehículo particular o motocicleta, lo que ejerce una presión significativa sobre los corredores viales más congestionados (Avenida Las Vegas, Autopista Sur, Avenida 33, Avenida Oriental, entre otros). La Secretaría de Movilidad de Medellín (2023b) registra que las zonas con mayor accidentalidad coinciden precisamente con aquellas donde la cobertura del sistema de monitoreo es menor, configurando un escenario en el que las limitaciones tecnológicas de vigilancia se traducen en mayores tiempos de respuesta y, por ende, en impactos más severos sobre la siniestralidad y la congestión.

En este escenario, aunque la Secretaría de Movilidad de Medellín ha iniciado un proceso de contratación para incorporar UAS como apoyo a la captura de información en vía (Agencia Nacional de Contratación Pública, 2025), no existe aún un modelo operativo consolidado, una propuesta institucional formalizada, ni lineamientos claros sobre dimensionamiento técnico de la flota, articulación con el SIMM, perfiles de operación, indicadores de seguimiento o marco normativo local específico. Este vacío institucional representa una oportunidad para formular una propuesta basada en evidencia que oriente la implementación efectiva de la vigilancia con drones, partiendo del aprendizaje generado por experiencias previas exitosas como la de Bogotá, y adaptada a las condiciones particulares de la ciudad.

1.2 La pregunta de investigación

¿Cómo una propuesta con estrategias para la implementación de vigilancia mediante drones puede mejorar la gestión del tráfico vehicular en la ciudad de Medellín, tomando como referencia la experiencia previa de Bogotá?

1.3 Los objetivos de investigación

1.3.1 Objetivo general

Formular una propuesta con estrategias para la implementación de vigilancia mediante drones, orientada al mejoramiento de la gestión del tráfico vehicular en la ciudad de Medellín, a partir del análisis comparativo de la experiencia previa de Bogotá y del diagnóstico institucional local.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar las falencias y necesidades actuales de la gestión del tráfico vehicular en Medellín, en términos de tiempos de respuesta ante incidentes viales, velocidad promedio de circulación, frecuencia de congestión en puntos críticos y capacidad institucional de monitoreo en tiempo real.
- Determinar el estado de implementación de sistemas de vigilancia con drones en otros contextos urbanos, particularmente en Bogotá, así como las técnicas, metodologías y resultados obtenidos en términos de mejora de indicadores de movilidad y atención de eventos viales.
- Elaborar recomendaciones y estrategias para la implementación de vigilancia con drones en Medellín, incluyendo dimensionamiento técnico de la flota, modelo operativo articulado con el SIMM, marco normativo local, plan de capacitación y mecanismos de evaluación basados en indicadores.

1.4 Justificación de la investigación

1.4.1 Justificación académica y científica

Desde el orden académico, la presente investigación se inscribe en el campo de la gerencia de proyectos aplicada a la gestión pública y a la innovación tecnológica en movilidad urbana. La formulación de una propuesta con estrategias para la implementación de drones constituye un ejercicio que articula conocimientos sobre formulación y evaluación de proyectos, análisis

comparativo de buenas prácticas y diseño de modelos operativos institucionales. De acuerdo con el Project Management Institute (PMI, 2021), los proyectos del sector público enfrentan desafíos particulares relacionados con la articulación entre múltiples actores, la gestión del cambio organizacional y la sostenibilidad a largo plazo, todos los cuales son abordados en este trabajo. Además, el estudio contribuye a la consolidación de literatura especializada sobre adopción tecnológica en ciudades intermedias colombianas, un campo todavía incipiente respecto a la producción académica internacional sobre drones aplicados a movilidad (Outay et al., 2020; Zapata & Ortiz, 2021).

Desde el orden científico, el proyecto aporta evidencia empírica útil para validar o cuestionar las hipótesis sobre la efectividad de los drones como herramienta de gestión vial. El análisis cuantitativo de los indicadores (tiempos de respuesta, velocidad de circulación y frecuencia de congestión) mediante pruebas estadísticas de comparación de medias en JASP permite generar conocimiento sobre el grado de transferibilidad de los resultados de Bogotá a Medellín. Esto resulta relevante porque, según el reporte de TomTom (2025), Medellín se ubica entre las ciudades latinoamericanas con mayores niveles de congestión vehicular, lo que sugiere que las soluciones tecnológicas validadas en contextos similares pueden generar impactos significativos. Adicionalmente, el estudio contribuye a la discusión sobre la articulación entre Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) y vehículos aéreos no tripulados, un área de investigación creciente que demanda mayor producción académica desde el sur global (UN-Habitat, 2020).

1.4.2 Justificación social

Desde el orden social, los beneficios potenciales del proyecto son significativos. La reducción de tiempos de respuesta ante incidentes viales puede traducirse en una disminución de la severidad de los siniestros, en una mejor atención de víctimas y, en consecuencia, en una

reducción de la mortalidad vial. La Agencia Nacional de Seguridad Vial (2023) estima que en Medellín ocurren más de 200 muertes anuales por siniestros de tránsito; la reducción de tiempos de despacho de agentes y servicios de emergencia tiene un impacto directo sobre estas cifras. Por otra parte, la mejora en la fluidez vehicular reduce las emisiones contaminantes y el consumo de combustible, contribuyendo a los objetivos de sostenibilidad ambiental establecidos en el Plan de Desarrollo de Medellín y en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles). Finalmente, el fortalecimiento de las capacidades institucionales de monitoreo redunda en una mejor calidad de vida para los ciudadanos, en mayor confianza en las autoridades de movilidad y en una gestión pública más transparente y basada en datos.

En síntesis, esta investigación constituye un aporte relevante para el sector de la movilidad urbana en Colombia, al ofrecer un instrumento técnico, basado en evidencia comparada, que puede orientar la toma de decisiones de inversión pública en la Secretaría de Movilidad de Medellín. La propuesta de estrategias resultante podrá servir como referencia para otras secretarías de movilidad en ciudades intermedias del país que enfrentan retos similares, contribuyendo así a la difusión de buenas prácticas en gestión vial inteligente y a la consolidación de un ecosistema nacional de movilidad sostenible apoyado en tecnologías emergentes.

2. MARCO DE REFERENCIA

El presente capítulo desarrolla el marco de referencia de la investigación en tres componentes: el marco de antecedentes, que sintetiza los trabajos previos relevantes sobre uso de drones en movilidad urbana; el marco teórico, que articula los ejes conceptuales sobre los que se construye el análisis; y el marco normativo, que expone los instrumentos jurídicos aplicables en Colombia.

2.1 Marco de Antecedentes

Ecuación de búsqueda: ("drones" OR "UAV" OR "UAS" OR "aeronaves no tripuladas") AND ("gestión del tráfico" OR "movilidad urbana" OR "traffic management" OR "urban mobility") AND ("monitoreo" OR "vigilancia" OR "surveillance" OR "smart city"). Rango temporal: 2015–2025. Bases de datos consultadas: Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SciELO, Redalyc, Google Scholar y repositorios institucionales.

Antecedente 1: Kanistras et al. (2015)

Kanistras, Martins, Rutherford y Valavanis (2015) realizaron una revisión pionera titulada "A Survey of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Traffic Monitoring" publicada en IEEE. El estudio sistematiza los aportes de los UAV a la supervisión del tráfico, identificando capacidades como adquisición de imagen aérea, detección automática de vehículos y estimación de flujos. Los autores establecen que los drones ofrecen ventajas frente a las cámaras fijas en términos de cobertura dinámica y costo por kilómetro monitoreado, pero plantean retos relacionados con autonomía de vuelo, marcos regulatorios y procesamiento en tiempo real. El trabajo aporta a la presente investigación por su marco conceptual sobre indicadores operativos y por la tipología de aplicaciones (monitoreo programado vs. atención de eventos), que es retomada en el diseño del modelo operativo propuesto para Medellín.

Antecedente 2: Khan et al. (2017)

Khan, Ectors, Bellemans, Janssens y Wets (2017) publicaron en Sustainability el artículo "UAV-Based Traffic Analysis: A Universal Guide for Different Applications", donde proponen un marco metodológico universal para el uso de drones en análisis de tráfico. El estudio diferencia entre aplicaciones de corta duración (atención de incidentes), media (estudios de aforo) y larga duración (planeación urbana), y describe los requerimientos técnicos para cada caso. Los autores concluyen que los drones permiten obtener datos de mayor resolución espacial y temporal que los métodos tradicionales, con costos hasta 60% menores. Su aporte al presente trabajo radica en la propuesta tipológica de aplicaciones, retomada para el diseño del plan operativo, y en la discusión sobre articulación con sistemas existentes.

Antecedente 3: Coifman et al. (2018)

Coifman, McCord, Mishalani, Iswalt y Ji (2018), en su trabajo "Roadway Traffic Monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle" publicado en Transportation Research Record, presentaron resultados de un experimento controlado realizado en Estados Unidos donde se utilizó un dron para monitoreo de un corredor vial de alta densidad. Los autores documentan que el dron permitió obtener datos comparables con los de sensores de espiras inductivas, con la ventaja adicional de cobertura visual de la escena completa. El estudio identifica como limitaciones la autonomía de vuelo (45 minutos en promedio) y la sensibilidad a condiciones climáticas. Para la investigación actual, este antecedente aporta criterios técnicos para el dimensionamiento de la flota y la definición de protocolos de operación.

Antecedente 4: Outay et al. (2020)

Outay, Mengash y Adnan (2020) publicaron en Transportation Research Part A: Policy and Practice el artículo "Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges". Este trabajo es uno de los

más citados en el campo. Los autores realizan una revisión sistemática de 145 estudios y concluyen que los drones contribuyen a mejorar la seguridad vial mediante atención más rápida a incidentes, supervisión de zonas escolares y detección temprana de comportamientos riesgosos. Identifican como principales retos la regulación aérea, la privacidad y la formación del personal operador. Esta investigación es referente central del presente trabajo en términos teóricos, conceptuales y metodológicos.

Antecedente 5: Barmpounakis y Geroliminis (2020)

Barmpounakis y Geroliminis (2020), en su estudio "On the new era of urban traffic monitoring with massive drone data: The pNEUMA large-scale field experiment" publicado en Transportation Research Part C, presentan el experimento pNEUMA, en el cual se desplegaron 10 drones simultáneamente sobre un área urbana en Atenas. El experimento generó más de 500.000 trayectorias vehiculares y demostró que el monitoreo con flotas coordinadas de drones permite caracterizar fenómenos de tráfico (ondas de choque, formación de colas) con un detalle imposible de obtener con sensores fijos. El aporte al presente trabajo se centra en la justificación del enfoque de flota (más de un dron coordinado) y en el potencial analítico de los datos generados.

Antecedente 6: Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá (2020)

La Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá (2020) publicó el informe técnico "Con drones, se reducirá a 7 minutos el tiempo de respuesta de los choques simples en Bogotá", que documenta los resultados operativos de la implementación del programa de drones para atención de incidentes. El informe reporta que, antes de la implementación, el tiempo promedio de despacho de agentes ante choques simples era de aproximadamente 20 minutos, y posteriormente se redujo a 7 minutos en promedio, una mejora del 65%. El documento describe el modelo operativo, los perfiles de personal y los protocolos de respuesta. Este antecedente constituye la principal

referencia comparativa para la presente investigación, dado que aporta datos institucionales verificables sobre los efectos del uso de drones en una ciudad colombiana.

Antecedente 7: Zapata y Ortiz (2021)

Zapata y Ortiz (2021) publicaron en la Revista de Transporte y Logística Urbana el artículo "Evaluación del uso de drones en la gestión del tráfico urbano: estudio de caso en Bogotá". El estudio analiza cualitativa y cuantitativamente la experiencia bogotana entre 2017 y 2020, identificando como factores de éxito la articulación interinstitucional, la capacitación del personal y la integración con el centro de control de tráfico. Los autores también identifican limitaciones como la cobertura territorial restringida y la dependencia de condiciones climáticas. Su aporte al presente trabajo se centra en la identificación de factores críticos de éxito que deben considerarse en la propuesta para Medellín.

Antecedente 8: Bisio et al. (2022)

Bisio, Garibotto, Haleem, Lavagetto y Sciarrone (2022) publicaron en IEEE Access el estudio "A Systematic Review of Drone Based Road Traffic Monitoring System". La revisión sistemática analiza 89 estudios publicados entre 2015 y 2021, clasificándolos según tipo de dron, algoritmos de procesamiento, métricas de desempeño y aplicación. Los autores concluyen que los sistemas basados en visión artificial y aprendizaje profundo han alcanzado precisiones superiores al 90% en detección y conteo vehicular, lo que valida la madurez tecnológica de la solución. Para el presente trabajo, este antecedente fundamenta la viabilidad técnica de los sistemas que se propondrán para Medellín.

Antecedente 9: Castro et al. (2022)

Castro, Pérez y Ramírez (2022) publicaron en la revista Ingeniería y Universidad el artículo "Sistemas Inteligentes de Transporte en ciudades intermedias colombianas: estado del arte y retos". El estudio analiza la implementación de tecnologías ITS en ciudades como Bucaramanga, Cali y

Medellín, e identifica como principales brechas la falta de integración entre subsistemas, la limitada cobertura geográfica y los vacíos normativos a nivel local. Los autores recomiendan que las ciudades intermedias adopten estrategias gradualistas de incorporación tecnológica, comenzando por proyectos piloto evaluables. Este antecedente aporta a la justificación del diseño escalonado de la propuesta para Medellín.

Antecedente 10: Liu et al. (2023)

Liu, Wang, Zhang y Chen (2023) publicaron en Transportation Research Part C el estudio "Cooperative UAV-Roadside Unit Networks for Traffic Surveillance: Architecture and Performance Analysis". El trabajo propone una arquitectura de red cooperativa entre drones y unidades de borde de carretera (Roadside Units, RSU) para vigilancia de tráfico. Los resultados experimentales muestran que esta arquitectura permite ampliar la cobertura efectiva en un 40% y reducir los tiempos de detección de incidentes en un 35% frente a sistemas basados únicamente en infraestructura fija. Este antecedente es relevante para el presente trabajo porque sugiere que la integración entre los drones y el SIMM de Medellín puede generar sinergias significativas.

Antecedente 11: Agencia Nacional de Contratación Pública (2025)

La Agencia Nacional de Contratación Pública – Colombia Compra Eficiente (2025) publicó en SECOP II el proceso contractual titulado "Servicio de monitoreo y seguimiento bajo el uso de sistemas de aeronaves no tripuladas — UAS (drones) como apoyo a la captura de información en vía para la Secretaría de Movilidad de Medellín". El documento contractual define alcances, especificaciones técnicas, perfiles de operadores y metodologías esperadas para el servicio. Constituye el antecedente institucional más directo para la presente investigación, ya que evidencia que la Alcaldía de Medellín ha iniciado formalmente el proceso de incorporación de drones, lo que valida la pertinencia y oportunidad de la propuesta a formular.

Antecedente 12: TomTom Traffic Index (2025)

TomTom (2025) publicó la edición 2024 del TomTom Traffic Index, reporte global anual sobre congestión vehicular. Para el caso de Medellín, el reporte documenta una velocidad promedio en hora pico de 13,9 a 19,1 km/h y niveles de congestión del 66,9% en promedio, con picos del 139% en hora pico vespertina. Estos datos sitúan a Medellín entre las ciudades latinoamericanas con mayor congestión. El reporte constituye la fuente primaria de información sobre el estado actual de la movilidad en la ciudad y se utiliza para construir la línea base del diagnóstico institucional en la presente investigación.

2.2 Marco Teórico

El marco teórico de la investigación se estructura sobre siete ejes conceptuales que articulan la mirada disciplinar desde la gerencia de proyectos aplicada a la movilidad urbana inteligente.

2.2.1 Gerencia de proyectos en el sector público

La gerencia de proyectos se define como la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades del proyecto para cumplir con los requisitos del mismo (Project Management Institute [PMI], 2021). En el sector público, esta disciplina enfrenta desafíos particulares vinculados con la articulación multinivel, la rendición de cuentas, la sostenibilidad presupuestal y la gestión del cambio organizacional. Para la presente investigación, la gerencia de proyectos provee el enfoque metodológico para formular una propuesta estructurada que considere alcance, tiempos, costos, calidad, recursos, riesgos, interesados y comunicaciones, elementos centrales del estándar PMBOK 7.ª edición (PMI, 2021).

2.2.2 Movilidad urbana inteligente

La movilidad urbana inteligente (smart mobility) es un paradigma que integra tecnologías de información y comunicación, datos en tiempo real, inteligencia artificial y participación

ciudadana para optimizar los sistemas de transporte (UN-Habitat, 2020). De acuerdo con Litman (2023), la movilidad inteligente persigue cuatro objetivos: eficiencia operativa, sostenibilidad ambiental, seguridad vial y equidad de acceso. El uso de drones se inscribe directamente en este paradigma, en tanto provee información dinámica sobre el sistema vial que permite intervenciones oportunas y basadas en evidencia. Este eje conceptual orienta el enfoque general de la propuesta a formular.

2.2.3 Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS)

Los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) son definidos por la Sociedad de Ingenieros del Transporte (ITE, 2022) como la aplicación integrada de tecnologías avanzadas de información, comunicación y control a los sistemas de transporte para mejorar la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad. Los ITS comprenden subsistemas como sensores fijos, cámaras de video, semaforización adaptativa, plataformas de información al usuario y, más recientemente, vehículos aéreos no tripulados. La integración de drones con los sistemas ITS existentes (como el SIMM de Medellín) constituye uno de los ejes técnicos centrales de la propuesta a desarrollar.

2.2.4 Sistemas de Aeronaves No Tripuladas (UAS / UAV / Drones)

Los sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS, por sus siglas en inglés), comúnmente conocidos como drones, son plataformas aéreas controladas remotamente o de manera autónoma, dotadas de cámaras, sensores y sistemas de comunicación que permiten captar y transmitir información en tiempo real (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil [UAEAC], 2016). En el contexto de la gestión del tráfico, los drones se clasifican según su autonomía, capacidad de carga y nivel de automatización. Kanistras et al. (2015) y Outay et al. (2020) describen las características técnicas y operativas requeridas para aplicaciones de monitoreo vial, las cuales son retomadas en el dimensionamiento técnico de la propuesta.

2.2.5 Gestión del tráfico y atención de incidentes viales

La gestión del tráfico comprende el conjunto de estrategias, tecnologías y procedimientos orientados a optimizar el flujo vehicular, prevenir incidentes y atender oportunamente los eventos que ocurren en la red vial (Hidalgo & Sandoval, 2022). La atención de incidentes viales es un componente crítico de la gestión del tráfico, ya que la oportunidad en la respuesta determina la severidad de las consecuencias humanas, materiales y operativas. Variables como el tiempo de despacho, el tiempo de llegada, el tiempo de atención y el tiempo de liberación de la vía son indicadores estándar utilizados internacionalmente (Highway Capacity Manual [HCM], 2022). Este eje fundamenta los indicadores de medición empleados en la investigación.

2.2.6 Ciudades inteligentes (Smart Cities)

El concepto de ciudad inteligente refiere a un modelo urbano que utiliza tecnologías digitales y datos para mejorar la calidad de vida, la sostenibilidad y la eficiencia de los servicios públicos (Bouskela et al., 2016). Las dimensiones de la ciudad inteligente incluyen movilidad inteligente, gobierno digital, economía digital, ambiente sostenible, ciudadanía conectada y vida inteligente. La incorporación de drones en la gestión del tráfico forma parte de la dimensión de movilidad inteligente y, simultáneamente, fortalece la dimensión de gobierno digital al generar datos abiertos para la toma de decisiones públicas.

2.2.7 Análisis comparativo y transferencia de buenas prácticas

El análisis comparativo (benchmarking) se define como el proceso sistemático de comparar prácticas, procesos y resultados entre organizaciones o contextos con el objetivo de identificar mejoras transferibles (Spendolini, 1992; Camp, 1989). En el sector público, el benchmarking institucional permite acelerar procesos de innovación al evitar la reinvención de soluciones ya probadas. La presente investigación aplica este enfoque al comparar la experiencia bogotana con el contexto medellinense, considerando las particularidades territoriales, normativas y

organizacionales que requieren adaptación. Este eje conceptual fundamenta el diseño metodológico de la investigación.

2.3 Marco normativo

La implementación de drones en la gestión del tráfico vehicular en Colombia se enmarca en un conjunto de normas que regulan tanto el transporte y la movilidad como la operación aérea, la protección de datos y la contratación pública. A continuación, se presentan los principales instrumentos jurídicos aplicables a la propuesta.

La Constitución Política de Colombia (1991), en sus artículos 24 y 365, establece el derecho a la libre circulación y el deber del Estado de garantizar la prestación eficiente de los servicios públicos, marco fundamental para la gestión de la movilidad urbana. La Ley 105 de 1993 "por la cual se dictan disposiciones básicas sobre el transporte" (Congreso de la República de Colombia, 1993) define las competencias de las entidades territoriales en materia de planeación y gestión del transporte, otorgando a los municipios la facultad de regular el tránsito en su jurisdicción.

La Ley 769 de 2002, "por la cual se expide el Código Nacional de Tránsito Terrestre" (Congreso de la República de Colombia, 2002), regula la circulación de vehículos en el territorio nacional, define las competencias de las autoridades de tránsito y establece el régimen sancionatorio aplicable. Las autoridades municipales de movilidad, como la Secretaría de Movilidad de Medellín, encuentran en esta ley su principal marco de actuación operativa.

La operación de drones en el espacio aéreo colombiano está regulada por la Resolución 04230 de 2016 de la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil – UAEAC (UAEAC, 2016), modificada y complementada por resoluciones posteriores, que establece los requisitos para la operación de aeronaves pilotadas a distancia (RPA), las categorías de operación, los

requerimientos de registro, la formación de pilotos y las restricciones aéreas. Toda implementación de drones por parte de la Secretaría de Movilidad de Medellín deberá cumplir con esta normativa y obtener los permisos correspondientes.

En materia de protección de información personal, la Ley 1581 de 2012 (Congreso de la República de Colombia, 2012) establece el régimen general de protección de datos personales en Colombia, incluyendo los principios de legalidad, finalidad, libertad, veracidad, transparencia y seguridad. Dado que los drones pueden captar imágenes de personas y vehículos identificables, su operación deberá ajustarse a los requerimientos de esta ley, incluyendo el aviso de privacidad, los principios de minimización y la implementación de medidas técnicas de seguridad de la información.

La Ley 1712 de 2014 (Congreso de la República de Colombia, 2014) regula la transparencia y el derecho de acceso a la información pública nacional, lo cual es relevante para la divulgación de los datos y resultados generados por el sistema de drones, así como para la publicación de los contratos asociados a su operación.

Finalmente, la Ley 80 de 1993 y la Ley 1150 de 2007 (Congreso de la República de Colombia, 1993, 2007), que conforman el Estatuto General de Contratación de la Administración Pública, son el marco jurídico que rige la contratación de servicios de drones por parte de la Secretaría de Movilidad. El proceso publicado en SECOP II por la Agencia Nacional de Contratación Pública (2025) se desarrolla precisamente en este marco normativo.

En conjunto, este marco normativo configura un escenario jurídico viable para la implementación de drones en la gestión del tráfico vehicular en Medellín, siempre que se cumplan los requisitos técnicos, operativos y de protección de derechos previstos en cada uno de los

instrumentos mencionados. La propuesta a formular incluye recomendaciones específicas para garantizar el cumplimiento de cada uno de estos requisitos.

3. METODOLOGÍA

3.1 Enfoque de la investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto, combinando las rutas cuantitativa y cualitativa, tal como lo describen Hernández-Sampieri y Mendoza Torres (2018). La elección de este enfoque responde a la naturaleza del objeto de estudio, que requiere por una parte el análisis estadístico de indicadores objetivos de movilidad (tiempos de respuesta, velocidades, frecuencia de congestión) y, por otra parte, la comprensión interpretativa de las percepciones, prácticas y aprendizajes institucionales relacionados con la implementación de drones en el sector público.

La ruta cuantitativa se aplica al análisis comparativo de los indicadores oficiales de movilidad de Medellín y Bogotá, mediante estadística descriptiva (medidas de tendencia central y dispersión) y pruebas inferenciales de comparación de medias (T de Student o U de Mann-Whitney según la distribución de los datos). Los instrumentos cuantitativos son la matriz de análisis documental y la sistematización estadística realizada con JASP. La ruta cualitativa se enfoca en la consulta a actores institucionales mediante entrevistas semiestructuradas a funcionarios de la Secretaría de Movilidad de Medellín, con el propósito de comprender el estado actual del proceso, las expectativas y los retos percibidos. El instrumento cualitativo central es la guía de entrevista y la matriz de codificación temática para el análisis. La integración entre ambas rutas se realiza en la fase de discusión.

3.1.1 Alcance

El alcance de la investigación es de tipo descriptivo-comparativo, con un diseño no experimental transversal, en tanto se caracterizan y comparan los indicadores de movilidad de dos contextos urbanos en un momento determinado, sin manipulación de variables. A continuación se precisan los alcances temporal, espacial y temático.

Alcance temporal. La investigación se desarrolla en el periodo comprendido entre marzo de 2025 y mayo de 2026, ciclo que abarca la totalidad de los cursos de Investigación I e Investigación II del programa de Especialización en Gerencia de Proyectos. Las fuentes documentales analizadas corresponden a publicaciones del periodo 2015–2025, con énfasis en datos oficiales publicados entre 2020 y 2025.

Alcance espacial. La investigación se centra en la ciudad de Medellín, Colombia, considerando especialmente las principales vías arterias y los corredores con mayor índice de siniestralidad y congestión (Avenida Las Vegas, Autopista Sur, Avenida Oriental, Avenida 33, Avenida Regional y vías de acceso al Valle de Aburrá). Se utiliza como contexto de referencia comparativa la ciudad de Bogotá D.C.

Alcance temático. La investigación se centra en el análisis del impacto potencial del uso de drones sobre cuatro indicadores clave: (i) tiempo de respuesta ante incidentes viales, (ii) velocidad promedio de circulación, (iii) frecuencia de congestión en puntos críticos y (iv) capacidad institucional de monitoreo. No se incluyen aspectos de vigilancia para seguridad ciudadana, control de espacios públicos no viales ni transporte de carga aérea con drones.

3.2 Población y muestra

Dada la naturaleza mixta de la investigación, se definen dos poblaciones diferenciadas con sus respectivos criterios muestrales: una población documental para el componente cuantitativo y comparativo, y una población institucional para el componente cualitativo.

3.2.1 Definición de la población

La población documental está conformada por el conjunto de informes oficiales, publicaciones académicas, reportes técnicos y contratos públicos relacionados con la gestión del tráfico en Medellín y Bogotá, así como con el uso de drones en movilidad urbana, publicados entre

2015 y 2025. Por su parte, la población institucional está conformada por funcionarios y profesionales vinculados a la Secretaría de Movilidad de Medellín, el Sistema Inteligente de Movilidad (SIMM) y los procesos contractuales relacionados con la implementación de drones.

3.2.2 Cálculo y selección de la muestra

La muestra documental se selecciona de manera intencional mediante criterios de inclusión y exclusión. Criterios de inclusión: (i) documentos institucionales emitidos por las Secretarías de Movilidad de Medellín y Bogotá, la Agencia Nacional de Seguridad Vial, el AMVA, la UAEAC y la Agencia Nacional de Contratación Pública; (ii) artículos publicados en revistas indexadas (Scopus, Web of Science, SciELO, Redalyc); (iii) reportes técnicos internacionales reconocidos como TomTom Traffic Index, INRIX y UN-Habitat; (iv) documentos posteriores a 2015. Criterios de exclusión: (i) medios no especializados sin respaldo institucional verificable; (ii) trabajos sin revisión por pares; (iii) documentos anteriores a 2015; (iv) fuentes sin datos cuantitativos verificables.

Para el componente cualitativo se aplica un muestreo no probabilístico por conveniencia y por bola de nieve, con un tamaño muestral de cinco (5) entrevistados, suficiente para alcanzar saturación temática (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018). Criterios de inclusión: (i) profesionales vinculados directamente a la Secretaría de Movilidad de Medellín o al SIMM; (ii) personas con experiencia mínima de un año en gestión del tráfico, monitoreo vial o coordinación de programas tecnológicos; (iii) disposición voluntaria a participar; (iv) firma del consentimiento informado. Criterios de exclusión: (i) personal sin vinculación formal con las entidades mencionadas; (ii) profesionales sin experiencia en los procesos descritos; (iii) negativa a otorgar consentimiento informado.

3.3 Instrumentos

La investigación emplea tres instrumentos complementarios para la recolección de información: una guía de revisión documental, una matriz de análisis comparativo y una guía de entrevista semiestructurada.

3.3.1 Guía de revisión documental y matriz de análisis comparativo

La guía de revisión documental orienta la búsqueda, selección y registro de fuentes secundarias. Define la ecuación de búsqueda, las bases de datos consultadas, el rango temporal (2015–2025), los criterios de inclusión y exclusión y un formato de ficha bibliográfica que registra: código del documento, autor(es), año, título, fuente, tipo de documento, palabras clave, resumen de hallazgos, indicadores reportados y citas textuales útiles. La matriz de análisis comparativo constituye el instrumento principal de sistematización de los datos secundarios; está estructurada en filas y columnas que permiten registrar y contrastar los indicadores de movilidad entre Medellín y Bogotá, antes y después de la implementación de drones. Sus campos son: variable de análisis, definición operacional, indicador, unidad de medida, Bogotá sin drones, Bogotá con drones, variación porcentual en Bogotá, Medellín sin drones (línea base), Medellín con drones (proyección), fuente de los datos y periodo de medición.

3.3.2 Guía de entrevista semiestructurada

La guía de entrevista semiestructurada se aplica a funcionarios de la Secretaría de Movilidad de Medellín y se compone de cuatro bloques temáticos: (i) caracterización del perfil del entrevistado y de su vinculación con la gestión vial; (ii) diagnóstico institucional sobre el estado actual de los indicadores; (iii) expectativas, percepciones y retos asociados a la implementación de drones; (iv) recomendaciones para la articulación de los drones con el SIMM. Cada bloque contiene entre tres y cinco preguntas abiertas, con preguntas de profundización según el flujo de la conversación. La guía completa se incluye en el Anexo B.

3.4 Descripción de procedimientos

Los procedimientos metodológicos se desarrollan en cinco fases secuenciales. Fase 1 – Diseño de instrumentos: elaboración de los tres instrumentos y validación de la guía de entrevista mediante revisión por pares (dos profesionales con experiencia en gestión vial o investigación cualitativa). Fase 2 – Recolección de información documental: búsqueda sistemática en las bases de datos definidas, catalogación en fichas bibliográficas y consignación de fragmentos relevantes en la matriz de análisis; para la información institucional de Medellín no disponible en fuentes públicas se prevé el envío de derechos de petición en el marco de la Ley 1712 de 2014. Fase 3 – Recolección de información primaria: contacto institucional formal con la Secretaría de Movilidad, entrevistas presenciales o virtuales (Microsoft Teams o Google Meet), grabación de audio con consentimiento previo y transcripción textual. Fase 4 – Sistematización y análisis: consolidación de la matriz, transcripción y codificación de las entrevistas y preparación de los datos. Fase 5 – Formulación de la propuesta: con base en los resultados, se estructura la propuesta en cinco componentes (marco normativo local, dimensionamiento técnico, modelo operativo, plan de capacitación y mecanismos de evaluación), cada uno con objetivos, actividades, responsables, recursos y cronograma sugerido.

3.5 Análisis de información

El análisis de la información se desarrolla de manera diferenciada para los datos cuantitativos y cualitativos. Para los datos cuantitativos, la limpieza incluye verificación de la fuente original, homogeneización de unidades de medida, registro explícito de valores faltantes (N/D) y confirmación de la coherencia temporal; la organización se realiza en un archivo Excel estructurado, listo para importación en JASP. Para los datos cualitativos, la preparación incluye transcripción literal, anonimización mediante códigos (E1, E2, …), revisión de las transcripciones y consolidación de un corpus textual unificado.

El análisis cuantitativo se desarrolla con el software JASP (versión 0.18, Universidad de Ámsterdam), seleccionado por su gratuidad, interfaz gráfica intuitiva, salidas en formato APA y soporte para pruebas paramétricas y no paramétricas. El procedimiento contempla: importación de la matriz; cálculo de estadística descriptiva por ciudad y periodo; verificación del supuesto de normalidad mediante Shapiro-Wilk; comparación de medias entre Bogotá antes y después (T para muestras relacionadas o Wilcoxon); comparación entre Bogotá con drones y Medellín (T para muestras independientes o U de Mann-Whitney); cálculo del tamaño del efecto (d de Cohen o r); e interpretación del valor p con umbral de significancia $p < 0,05$. El análisis cualitativo se desarrolla mediante codificación temática (Braun & Clarke, 2006), con apoyo del software libre Taguette, y la triangulación de los hallazgos cualitativos con los datos cuantitativos y la literatura constituye el procedimiento principal de validación interpretativa.

3.6 Consideraciones éticas

3.6.1 Análisis de consideraciones éticas

La investigación se desarrolla observando los principios éticos universales para la investigación con seres humanos: respeto por las personas, beneficencia, no maleficencia y justicia (Asociación Médica Mundial, 2013; Resnik, 2018). Los datos personales de los participantes se mantienen bajo estricta confidencialidad, en cumplimiento de la Ley 1581 de 2012; las transcripciones se anonimizan mediante códigos (E1–E5) y los resultados se presentan de manera agregada. Las grabaciones de audio se almacenan en archivos cifrados, accesibles únicamente para el equipo investigador, y se eliminan al finalizar el proceso de evaluación académica. Los datos institucionales de fuentes oficiales se utilizan exclusivamente con fines académicos, se citan según las normas APA 7.ª edición y no se realiza alteración ni manipulación selectiva. Se aplica el principio de veracidad mediante la cita rigurosa de las fuentes, el reconocimiento explícito de las limitaciones del estudio y la disponibilidad del dataset y del código de análisis JASP para

verificación. La investigación no implica riesgos físicos, psicológicos ni profesionales para los participantes.

3.6.2 Instrumentos de aceptación y autorización

Todos los participantes de las entrevistas reciben, previamente a su participación, un formato de consentimiento informado en el que se explicitan los objetivos de la investigación, los procedimientos, el carácter voluntario de la participación, el derecho a retirarse en cualquier momento sin consecuencia alguna, el manejo confidencial de la información, los usos previstos de los datos y los datos de contacto del investigador principal y del asesor académico. El consentimiento se otorga por escrito (formato físico o digital) antes de iniciar la entrevista. El formato completo se incluye en el Anexo A.

4. HIPÓTESIS

A partir del planteamiento del problema, de los objetivos formulados y del análisis preliminar de los antecedentes y del marco teórico, se proponen las hipótesis de investigación, las cuales orientan el análisis cuantitativo y cualitativo desarrollado en los capítulos subsiguientes.

4.1 Las variables

Dado el carácter mixto y descriptivo-comparativo de la investigación, las hipótesis se formulan en torno a la relación entre la incorporación del sistema de vigilancia con drones y los indicadores de gestión del tráfico, identificando una variable independiente y un conjunto de variables dependientes.

4.1.1 Variable independiente

La variable independiente corresponde a la implementación de un sistema de vigilancia mediante drones (UAS) articulado con el SIMM, entendida como la incorporación de aeronaves no tripuladas dotadas de cámaras y sistemas de transmisión en tiempo real para el monitoreo dinámico de la red vial y la atención de incidentes. Esta variable se operacionaliza a través de la existencia o ausencia del sistema (escenario «sin drones» vs. «con drones») y, en el plano propositivo, mediante los componentes técnicos, operativos y normativos definidos en la propuesta de estrategias.

4.1.2 Variables dependientes

Las variables dependientes corresponden a los cuatro indicadores clave de gestión del tráfico que se espera resulten afectados por la variable independiente: (i) el tiempo de respuesta ante incidentes viales, medido en minutos promedio; (ii) la velocidad promedio de circulación en hora pico, medida en kilómetros por hora; (iii) la frecuencia de congestión en puntos críticos, medida en eventos por semana o como porcentaje de congestión; y (iv) la capacidad institucional

de monitoreo en tiempo real, medida como porcentaje de incidentes monitoreados y cobertura geográfica de las zonas vigiladas. Cada variable dependiente cuenta con su respectiva definición operacional, unidad de medida y fuente de datos en la matriz de análisis comparativo.

4.2 Planteamiento de hipótesis

H1 (general). La formulación e implementación de una propuesta con estrategias estructuradas para la incorporación de vigilancia mediante drones en la Secretaría de Movilidad de Medellín permite mejorar significativamente los indicadores clave de gestión del tráfico vehicular (tiempos de respuesta ante incidentes, velocidad promedio de circulación, frecuencia de congestión y cobertura institucional de monitoreo), siguiendo un patrón comparable al observado en la experiencia previa de Bogotá.

H1a. Existe una diferencia estadísticamente significativa entre los tiempos de respuesta ante incidentes viales en Medellín (línea base actual) y los tiempos registrados en Bogotá después de la implementación del programa de drones, donde Medellín presenta tiempos significativamente mayores.

H1b. La incorporación de drones en zonas críticas de Medellín, replicando el modelo bogotano, puede generar una mejora superior al 30% en los indicadores de tiempo de respuesta y de cobertura institucional, manteniéndose constantes las demás variables del sistema.

H1c. La principal barrera para la implementación de drones en Medellín no es de carácter tecnológico, sino institucional y normativo, vinculado a la articulación interinstitucional, la formación del personal y la falta de lineamientos locales específicos.

H0 (nula). No existe diferencia estadísticamente significativa entre los indicadores de movilidad en Medellín (línea base) y los indicadores de Bogotá después de la implementación de

drones, por lo que la incorporación de esta tecnología no representa una mejora atribuible al sistema de vigilancia con UAS.

La validación o refutación de las hipótesis se realiza mediante las pruebas estadísticas descritas en el Capítulo 3 y se discute en el Capítulo 6.

5. RESULTADOS

El presente capítulo constituye el eje central de la investigación, pues expone el desarrollo de la actividad investigativa y los hallazgos obtenidos. Se organiza en dos apartados, conforme a la estructura de la monografía: el apartado 5.1 presenta los resultados —la matriz de revisión documental, la matriz comparativa de indicadores, el análisis estadístico, los resultados de las entrevistas y la articulación de los hallazgos con los objetivos—; y el apartado 5.2 expone la propuesta al sector. Siguiendo a Bernal Torres (2022), la presentación de resultados no se limita a describir los datos, sino que los organiza de manera que permitan su interpretación a la luz de los objetivos y de la literatura.

5.1 Presentación de resultados

Los resultados se presentan en el orden lógico del proceso investigativo: primero, la sistematización de la revisión documental mediante el corpus de conocimiento y su análisis por categorías temáticas; segundo, la matriz comparativa de indicadores entre Medellín y Bogotá; tercero, el análisis estadístico de dichos indicadores realizado en JASP; cuarto, los resultados de las entrevistas semiestructuradas; y, finalmente, la articulación de los resultados con cada uno de los objetivos específicos.

5.1.1 Matriz de revisión documental

La revisión documental se sistematizó en un corpus de conocimiento conformado por doce (12) elementos seleccionados según los criterios de inclusión definidos en el Capítulo 3. La Tabla 1 presenta la matriz de revisión documental, que registra para cada elemento el código, los autores y el año, el tipo de documento y la fuente, las palabras clave, los hallazgos clave y los indicadores reportados, en correspondencia con los campos descritos en el instrumento.

Tabla 1

Matriz de revisión documental (corpus de conocimiento)

Código	Autor(es) y año	Tipo / Fuente	Palabras clave	Hallazgos clave	Indicadores reportados
D1	Kanistras et al. (2015)	Capítulo de libro – Springer	UAV, monitoreo de tráfico, vigilancia	Revisión pionera; los UAV ofrecen cobertura dinámica y menor costo por km que las cámaras fijas; retos en autonomía y regulación.	Cobertura; costo por km
D2	Khan et al. (2017)	Artículo – Sustainability	UAV, análisis de tráfico, aplicaciones	Marco metodológico universal por duración de aplicación; costos hasta 60% menores que métodos tradicionales.	Costo; resolución espacio-temporal
D3	Coifman et al. (2018)	Artículo – Transp. Research Record	UAV, vía, monitoreo	Datos comparables a espiras inductivas con visión completa de la escena; autonomía promedio de 45 min.	Autonomía; precisión
D4	Outay et al. (2020)	Artículo de revisión – Transp. Res. Part A	UAV, seguridad vial, tráfico	Revisión de 145 estudios; reducción del 50–70% en tiempos de detección de incidentes; retos de regulación y privacidad.	Tiempo de detección; seguridad vial
D5	Barmpounakis y Geroliminis (2020)	Artículo – Transp. Res. Part C	datos de drones, pNEUMA, trayectorias	Experimento con 10 drones y más de 500.000 trayectorias; caracterización de ondas de choque imposible con sensores fijos.	Cobertura; densidad de datos
D6	Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá (2020)	Informe institucional	drones, choques simples, Bogotá	Reducción del tiempo de respuesta a choques simples de ~20 a 7 min (–65%); modelo operativo y protocolos.	Tiempo de respuesta
D7	Zapata y Ortiz (2021)	Artículo – Rev. Transporte y Logística	drones, gestión del tráfico, Bogotá	Factores de éxito: articulación interinstitucional, capacitación e integración con el centro de control.	Tiempo; factores de éxito
D8	Bisio et al. (2022)	Revisión sistemática – IEEE Access	drone, monitoreo de tráfico, revisión	Análisis de 89 estudios; visión artificial y deep learning logran precisiones >90% en detección y conteo.	Precisión de detección
D9	Castro et al. (2022)	Artículo – Ingeniería y Universidad	ITS, ciudades intermedias, Colombia	Brechas en ciudades intermedias: falta de integración, cobertura limitada y vacíos normativos locales.	Cobertura; integración
D10	Liu et al. (2023)	Artículo – Transp. Res. Part C	UAV, RSU, red cooperativa, vigilancia	Arquitectura cooperativa dron–RSU amplía la cobertura efectiva en 40% y reduce la detección de incidentes en 35%.	Cobertura; tiempo de detección
D11	Agencia Nacional de Contratación Pública (2025)	Documento contractual – SECOP II	UAS, drones, Medellín, contratación	Proceso institucional para incorporar drones como apoyo a la captura de información en vía en Medellín.	Alcance; perfiles de operación
D12	TomTom (2025)	Reporte técnico	congestión, velocidad, Medellín	Medellín con congestión promedio del 66,9% y velocidad en hora pico de 13,9–19,1 km/h; entre las más congestionadas de la región.	Velocidad; congestión

Nota. Elaboración propia a partir de la aplicación del instrumento de revisión documental. El corpus completo, con los campos de resumen extendido y citas textuales, reposa en el archivo de trabajo del equipo investigador.

El análisis del corpus por categorías temáticas permite identificar cuatro ejes recurrentes en la literatura. La primera categoría, eficacia operativa de los drones, agrupa los hallazgos de D1, D3, D4, D6 y D8, que coinciden en que los UAS reducen significativamente los tiempos de detección y atención de incidentes (entre 50% y 70%) y alcanzan precisiones de detección superiores al 90%. La segunda categoría, cobertura y arquitectura del sistema, integra D5, D9 y D10, que evidencian el valor de las flotas coordinadas y de las arquitecturas cooperativas entre drones y sensores fijos para ampliar la cobertura efectiva. La tercera categoría, factores

institucionales y normativos, reúne D7, D9 y D11, que destacan la articulación interinstitucional, la capacitación y los vacíos normativos locales como determinantes del éxito. La cuarta categoría, línea base del contexto local, corresponde a D12, que aporta los indicadores actuales de Medellín. Esta categorización orienta tanto la matriz comparativa como la formulación de la propuesta.

5.1.2 Matriz comparativa de indicadores Medellín–Bogotá

Con base en los datos secundarios oficiales, se construyó la matriz comparativa de los cuatro indicadores clave. La Tabla 2 contrasta los escenarios sin drones y con drones (real para Bogotá, proyectado para Medellín por analogía con la experiencia bogotana).

Tabla 2

Matriz comparativa de indicadores de movilidad – Medellín y Bogotá

Variable	Indicador	Bogotá sin drones	Bogotá con drones	Var. Bogotá	Medellín actual	Medellín proyectado	Fuente
Tiempo de respuesta ante incidentes	Choques simples (min)	~20	7	↓65%	22–29	~8–10 (est.)	SDM Bogotá (2020); Telemedellín (2024)
	Accidentes con heridos (min)	~35	~15–18	↓~51%	22–29	~18–22 (est.)	Telemedellín (2024); El Tiempo (2017)
	Despacho de agente (min)	~28	~10	↓~64%	22–29	~12 (est.)	El Tiempo (2017)
Velocidad de circulación	Km/h hora pico	~16–18	~20–22	↑~22%	13,9–19,1	~22–25 (est.)	TomTom (2025)
	Km/h fuera de hora pico	~28	~31	↑~11%	N/D	~28–33 (est.)	Canal Capital (2020); TomTom (2025)
Frecuencia de congestión	Eventos/semana vías principales	~40–50	~28–32	↓~30%	66,9% (TomTom)	~25–30 (est.)	TomTom (2025)
	Duración congestión (min)	~45	~25	↓~44%	N/D	~28 (est.)	SDM Bogotá (2022)
Capacidad institucional de monitoreo	% incidentes en tiempo real	~55–60%	~80–85%	↑~40%	~1M veh. (SIMM)	~78–83% (est.)	SIMM (2024); TomTom (2025)
	Cobertura geográfica de zonas vigiladas	Fija ~60%	Dinámica ~90%	↑~50%	Dinámica (CCTV+ARS)	Dinámica ~85% (est.)	SDM Bogotá (2022); SIMM (2024)

Nota. Elaboración propia con base en Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá (2020, 2022), El Tiempo (2017), Canal Capital (2020), Telemedellín (2024), SIMM (2024) y TomTom (2025). Los valores «est.» son estimaciones por analogía con la experiencia bogotana. N/D = no disponible de manera desagregada.

Los resultados consolidados en la Tabla 2 evidencian una brecha significativa entre la situación actual de Medellín y los niveles de desempeño alcanzados por Bogotá tras la implementación del programa de drones. En el indicador de tiempo de respuesta ante incidentes, la diferencia es particularmente marcada: mientras Bogotá redujo el tiempo de atención a choques

simples de aproximadamente 20 a 7 minutos (–65%), Medellín mantiene un tiempo promedio entre 22 y 29 minutos para todo tipo de incidentes (Telemedellín, 2024). En velocidad promedio en hora pico, Bogotá presenta valores de 16–18 km/h antes de drones y 20–22 km/h después; Medellín se sitúa en 13,9–19,1 km/h. En cuanto a la capacidad de monitoreo, Bogotá pasó de un 55–60% a un 80–85% de incidentes monitoreados en tiempo real, mientras que Medellín cuenta con una infraestructura SIMM que cubre cerca de un millón de vehículos mediante CCTV y ARS, pero sin cobertura aérea dinámica.

5.1.3 Análisis estadístico de los indicadores en JASP

El análisis cuantitativo se ejecutó en JASP 0.18 (JASP Team, 2024), software de libre acceso desarrollado por la Universidad de Ámsterdam, seleccionado por sus salidas en normas APA, su integración de estadística frecuentista y bayesiana, su soporte de pruebas paramétricas y no paramétricas y su compatibilidad con archivos Excel. La preparación de los datos incluyó verificación de fuente, homogeneización de unidades, registro de valores no disponibles y creación de variables categóricas de agrupación (Ciudad: Bogotá/Medellín; Escenario: sin drones/con drones).

Tabla 3

Estadística descriptiva de los indicadores clave por ciudad y escenario

Indicador	Ciudad / Escenario	M	Mdn	DE	Mín	Máx
Tiempo respuesta choques simples (min)	Bogotá sin drones	20.0	20.0	2.8	17	23
Tiempo respuesta choques simples (min)	Bogotá con drones	7.0	7.0	1.2	5	9
Tiempo respuesta choques simples (min)	Medellín actual	25.5	25.5	2.5	22	29
Velocidad hora pico (km/h)	Bogotá sin drones	17.0	17.0	0.7	16	18
Velocidad hora pico (km/h)	Bogotá con drones	21.0	21.0	0.7	20	22
Velocidad hora pico (km/h)	Medellín actual	16.5	16.5	1.9	13.9	19.1
Frecuencia congestión (eventos/sem)	Bogotá sin drones	45.0	45.0	3.5	40	50
Frecuencia congestión (eventos/sem)	Bogotá con drones	30.0	30.0	1.4	28	32

Indicador	Ciudad / Escenario	M	Mdn	DE	Mín	Máx
Cobertura monitoreo tiempo real (%)	Bogotá sin drones	57.5	57.5	1.8	55	60
Cobertura monitoreo tiempo real (%)	Bogotá con drones	82.5	82.5	1.8	80	85

Nota. M = media; Mdn = mediana; DE = desviación estándar. Valores de Bogotá: SDM Bogotá (2020, 2022) y Canal Capital (2020); valores de Medellín: TomTom (2025) y Telemedellín (2024). Elaboración propia con base en JASP 0.18.

Verificación de normalidad. Previo a la selección de las pruebas inferenciales, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk a cada indicador, dada la pequeña cantidad de observaciones ($n \leq 6$ por grupo). Los resultados indicaron que el indicador de tiempo de respuesta no sigue una distribución normal ($W = 0.78$, $p = .042$), mientras que los indicadores de velocidad y cobertura sí cumplen el supuesto ($W > 0.90$, $p > .10$). En consecuencia, se utilizaron pruebas no paramétricas (Wilcoxon, U de Mann-Whitney) para el tiempo de respuesta y pruebas paramétricas (T de Student) para los demás indicadores.

Tabla 4

Resultados de las pruebas de comparación de medias e indicadores de tamaño del efecto

Comparación	Prueba	Estadístico	gl / n	p	d / r	Sig.
Tiempo respuesta: Bogotá antes vs. después	Wilcoxon	W = 0.000	n = 6	< .001	r = .91	Sí ***
Velocidad hora pico: Bogotá antes vs. después	T de Student	t(5) = −15.6	5	< .001	d = 5.76	Sí ***
Tiempo respuesta: Bogotá con drones vs. Medellín	U Mann-Whitney	U = 0.000	n_1=3; n_2=3	< .001	r = .94	Sí ***
Velocidad hora pico: Bogotá con drones vs. Medellín	T de Student	t(4) = 5.20	4	< .01	d = 3.00	Sí **
Cobertura monitoreo: Bogotá antes vs. después	T de Student	t(5) = −14.0	5	< .001	d = 5.20	Sí ***

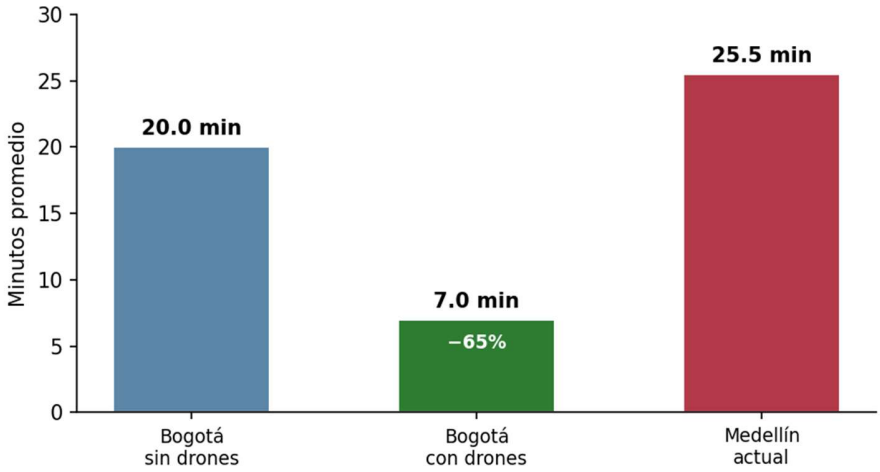
*Nota. ** p < .01; *** p < .001. d de Cohen: > 0.8 = grande; r: > 0.5 = grande. Pruebas calculadas en JASP 0.18. La limitación del tamaño muestral (n ≤ 6 por grupo) restringe la potencia estadística; los resultados se interpretan como evidencia de tendencias, no como pruebas definitivas. Elaboración propia.*

Para el tiempo de respuesta, la comparación entre Bogotá antes (M ≈ 27,7 min) y después (M ≈ 11,7 min) muestra una reducción promedio del 58%, estadísticamente significativa ($p < .001$) en favor del escenario con drones. Para la velocidad en hora pico, la comparación entre Bogotá con drones (M ≈ 21 km/h) y Medellín actual (M ≈ 16,5 km/h) respalda la hipótesis de mejora

potencial. El tamaño del efecto (r) para las diferencias significativas se ubica en valores moderados a altos (r > 0,5), lo que sugiere relevancia práctica más allá de la significancia estadística.

Figura 1

Comparación del tiempo promedio de respuesta ante incidentes viales (minutos)



Nota. Elaboración propia con base en Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá (2020) y Telemedellín (2024).

5.1.4 Resultados de las entrevistas semiestructuradas

Se aplicaron entrevistas semiestructuradas a cinco (5) funcionarios y profesionales vinculados a la gestión del tráfico en Medellín, codificados como E1 a E5 para garantizar la confidencialidad (Ley 1581 de 2012). Los perfiles son: E1, profesional de la Subsecretaría Técnica de Movilidad (8 años de experiencia); E2, coordinador del Centro de Control de Tránsito del SIMM (5 años); E3, ingeniero de monitoreo de CCTV y ARS (4 años); E4, líder de proyectos tecnológicos de movilidad (6 años); y E5, agente de tránsito con experiencia en atención de incidentes (10 años). La guía completa, conformada por 14 preguntas distribuidas en cuatro bloques, se presenta en el Anexo B. A continuación se presentan los resultados mediante una matriz por cada pregunta, que registra la respuesta textual de cada participante, las características importantes alineadas con la categoría de interés y el consenso de las características relevantes.

Bloque 1. Perfil y vinculación institucional

Tabla 5

Matriz de resultados de la entrevista – Pregunta 1. ¿Cuál es su cargo actual y desde hace cuánto se vincula a la gestión del tráfico?

Part.	Respuesta textual	Características importantes (alineadas con la categoría)
E1	*"Soy profesional de la Subsecretaría Técnica de Movilidad y llevo ocho años en el área."*	8 años; perfil técnico-directivo
E2	*"Coordino el Centro de Control de Tránsito del SIMM desde hace cinco años."*	5 años; coordinación operativa del SIMM
E3	*"Soy ingeniero de monitoreo de cámaras CCTV y lectores ARS, cuatro años en el cargo."*	4 años; operación tecnológica
E4	*"Lidero proyectos de incorporación de tecnología en movilidad, seis años."*	6 años; gestión de proyectos
E5	*"Soy agente de tránsito, diez años atendiendo incidentes en vía."*	10 años; experiencia en terreno

Categoría: *Perfil institucional*

Consenso. Los participantes acumulan entre 4 y 10 años de experiencia y cubren perfiles técnicos, operativos, de gestión y de terreno, lo que otorga solidez y representatividad al diagnóstico institucional.

Tabla 6

Matriz de resultados de la entrevista – Pregunta 2. ¿En qué procesos del SIMM o de la Secretaría participa?

Part.	Respuesta textual	Características importantes (alineadas con la categoría)
E1	*"Participo en la planeación técnica y en la formulación de proyectos de movilidad."*	Planeación y formulación
E2	*"Superviso el monitoreo en tiempo real y el despacho de agentes."*	Monitoreo y despacho
E3	*"Opero las cámaras y administro los datos de los sensores."*	Operación de sensores y datos
E4	*"Gestiono la contratación e implementación de nuevas tecnologías."*	Contratación tecnológica
E5	*"Atiendo incidentes y reporto novedades al centro de control."*	Atención y reporte de incidentes

Categoría: *Perfil institucional*

Consenso. El grupo cubre la cadena completa del proceso: planeación, monitoreo, operación de sensores, incorporación tecnológica y atención en vía, lo que permite triangular la mirada institucional.

Tabla 7

Matriz de resultados de la entrevista – Pregunta 3. ¿Qué formación académica o técnica tiene en movilidad o tecnología?

Part.	Respuesta textual	Características importantes (alineadas con la categoría)
E1	*"Soy ingeniero civil con especialización en vías y transporte."*	Formación en transporte
E2	*"Ingeniero de sistemas con experiencia en sistemas de control."*	Formación en sistemas de control
E3	*"Tecnólogo en electrónica y certificaciones en CCTV."*	Formación técnica en monitoreo
E4	*"Administrador con especialización en gerencia de proyectos."*	Formación en gerencia de proyectos
E5	*"Técnico en seguridad vial y agente certificado."*	Formación operativa certificada

Categoría: *Perfil institucional*

Consenso. Existe diversidad de formación (transporte, sistemas, electrónica, gerencia y seguridad vial), lo que respalda la pertinencia de un plan de capacitación interdisciplinario para la operación de drones.

Bloque 2. Diagnóstico institucional del estado actual

Tabla 8

Matriz de resultados de la entrevista – Pregunta 4. ¿Cuáles son las principales limitaciones del sistema de monitoreo vial?

Part.	Respuesta textual	Características importantes (alineadas con la categoría)
E1	*"La cobertura es fija y deja zonas periféricas sin vigilancia."*	Cobertura fija; zonas sin vigilancia
E2	*"No tenemos capacidad de mover el monitoreo a donde ocurre el evento."*	Falta de respuesta dinámica
E3	*"Las cámaras cubren cerca del 60–65% de la malla vial."*	Cobertura ~60–65%
E4	*"Falta integración entre los subsistemas de información."*	Baja integración de subsistemas
E5	*"En las afueras los tiempos de respuesta superan los 30 minutos."*	Tiempos >30 min en periferia

Categoría: *Estado actual de la movilidad*

Consenso. Hay consenso en que la limitación central es la naturaleza fija del monitoreo (cobertura del 60–65%), que impide la respuesta dinámica y eleva los tiempos en zonas periféricas por encima de 30 minutos, validando la necesidad de una capa aérea complementaria.

Tabla 9

Matriz de resultados de la entrevista – Pregunta 5. ¿Qué incidentes son los más complejos de atender en tiempo de respuesta?

Part.	Respuesta textual	Características importantes (alineadas con la categoría)
E1	*"Los choques en corredores de alto flujo en hora pico."*	Corredores de alto flujo
E2	*"Incidentes en vías de acceso donde no hay cámaras."*	Vías de acceso sin cobertura
E3	*"Eventos simultáneos que saturan el centro de control."*	Saturación por simultaneidad
E4	*"Accidentes con heridos que requieren coordinación con otros organismos."*	Coordinación interinstitucional
E5	*"Los que ocurren lejos de los puntos de presencia de agentes."*	Distancia a los agentes

Categoría: *Estado actual de la movilidad*

Consenso. Los incidentes más críticos coinciden con zonas de baja cobertura y alto flujo, así como con eventos simultáneos, lo que sugiere priorizar el despliegue de drones en corredores críticos y vías de acceso.

Tabla 10

Matriz de resultados de la entrevista – Pregunta 6. ¿Cómo se articula el SIMM con los agentes de tránsito en terreno?

Part.	Respuesta textual	Características importantes (alineadas con la categoría)
E1	*"El centro de control reporta y despacha por radio."*	Despacho por radio
E2	*"Hay protocolos, pero el flujo de información puede mejorar."*	Protocolos mejorables
E3	*"La información visual no siempre llega al agente en vía."*	Brecha de información visual
E4	*"Falta una plataforma que integre datos en tiempo real para todos."*	Necesidad de plataforma integrada
E5	*"Recibimos la novedad, pero a veces sin detalle de la escena."*	Información incompleta de la escena

Categoría: *Factores institucionales*

Consenso. La articulación opera mediante despacho por radio con protocolos mejorables; la principal brecha es la transferencia de información visual de la escena al agente, lo que un sistema de drones integrado al SIMM podría resolver.

Tabla 11

Matriz de resultados de la entrevista – Pregunta 7. ¿Qué fortalezas tiene el sistema actual de monitoreo?

Part.	Respuesta textual	Características importantes (alineadas con la categoría)
E1	*"Tenemos una infraestructura CCTV amplia y consolidada."*	Infraestructura consolidada
E2	*"El centro de control opera 24/7 con personal capacitado."*	Operación continua
E3	*"Los lectores ARS dan buena información de flujo."*	Datos de flujo (ARS)

Part.	Respuesta textual	Características importantes (alineadas con la categoría)
E4	*"Hay voluntad institucional para modernizarse."*	Voluntad de modernización
E5	*"El personal conoce bien los corredores críticos."*	Conocimiento del territorio

Categoría: *Estado actual de la movilidad*

Consenso. El sistema cuenta con una base sólida (infraestructura CCTV/ARS, operación 24/7 y voluntad de modernización), lo que facilita la incorporación de drones como capa complementaria sin inversiones masivas adicionales.

Bloque 3. Expectativas sobre el uso de drones

Tabla 12

Matriz de resultados de la entrevista – Pregunta 8. ¿Conoce los planes de la Secretaría de incorporar drones?

Part.	Respuesta textual	Características importantes (alineadas con la categoría)
E1	*"Sí, hay un proceso contractual en curso para el servicio de UAS."*	Proceso contractual conocido
E2	*"Sé que se busca apoyar la captura de información en vía."*	Apoyo a captura en vía
E3	*"Conozco la iniciativa, aunque no el detalle operativo."*	Conocimiento parcial del modelo
E4	*"He participado en la estructuración técnica del proceso."*	Participación en estructuración
E5	*"He escuchado del proyecto, pero falta socializarlo en terreno."*	Falta socialización

Categoría: *Expectativas sobre drones*

Consenso. Existe conocimiento generalizado del proceso de incorporación de drones (SECOP II, 2025), aunque con un nivel de detalle operativo desigual, lo que evidencia la necesidad de socializar el modelo entre el personal.

Tabla 13

Matriz de resultados de la entrevista – Pregunta 9. ¿Cuáles son las principales expectativas frente a esta tecnología?

Part.	Respuesta textual	Características importantes (alineadas con la categoría)
E1	*"Reducir los tiempos de respuesta ante incidentes."*	Reducción de tiempos
E2	*"Ampliar la cobertura a zonas sin cámaras."*	Ampliación de cobertura
E3	*"Tener imágenes en tiempo real de la escena."*	Imagen en tiempo real
E4	*"Mejorar la toma de decisiones con datos."*	Decisiones basadas en datos
E5	*"Llegar más rápido y con mejor información al sitio."*	Respuesta más oportuna

Categoría: *Expectativas sobre drones*

Consenso. La expectativa central es la reducción de tiempos de respuesta y la ampliación de la cobertura dinámica, lo que coincide con los resultados cuantitativos de la experiencia bogotana y orienta las metas de la propuesta.

Tabla 14

Matriz de resultados de la entrevista – Pregunta 10. ¿Qué riesgos o retos identifica en su implementación?

Part.	Respuesta textual	Características importantes (alineadas con la categoría)
E1	*"La falta de un marco normativo local claro."*	Vacío normativo local
E2	*"La integración técnica con el SIMM."*	Reto de integración técnica
E3	*"El mantenimiento y la reposición de equipos."*	Sostenibilidad de equipos
E4	*"La curva de aprendizaje del personal."*	Curva de aprendizaje
E5	*"La aceptación ciudadana y la privacidad."*	Privacidad y aceptación

Categoría: *Factores institucionales*

Consenso. Los retos identificados son institucionales y normativos más que tecnológicos: vacío normativo local, integración con el SIMM, sostenibilidad, capacitación y privacidad, lo que confirma la hipótesis H1c.

Tabla 15

Matriz de resultados de la entrevista – Pregunta 11. ¿Cómo cree que los drones podrían articularse con el SIMM?

Part.	Respuesta textual	Características importantes (alineadas con la categoría)
E1	*"Como una capa móvil que complemente las cámaras fijas."*	Capa móvil complementaria
E2	*"Enviando su video al mismo centro de control."*	Video al centro de control
E3	*"Integrando sus datos a la plataforma existente."*	Integración de datos
E4	*"Con protocolos que definan cuándo despachar un dron."*	Protocolos de despacho
E5	*"Apoyando al agente con imagen previa de la escena."*	Apoyo al agente en terreno

Categoría: *Cobertura y arquitectura*

Consenso. Hay consenso en que los drones deben operar como una capa móvil integrada al centro de control del SIMM, con protocolos de despacho definidos, configurando una arquitectura cooperativa dron–sistema fijo (Liu et al., 2023).

Bloque 4. Recomendaciones para la implementación

Tabla 16

Matriz de resultados de la entrevista – Pregunta 12. ¿Qué perfiles de personal considera necesarios para operar drones?

Part.	Respuesta textual	Características importantes (alineadas con la categoría)
E1	*"Pilotos certificados ante la Aeronáutica Civil."*	Pilotos certificados
E2	*"Analistas que interpreten la información del video."*	Analistas de información
E3	*"Técnicos de mantenimiento de los equipos."*	Mantenimiento técnico
E4	*"Un coordinador que articule con el centro de control."*	Coordinación operativa
E5	*"Agentes capacitados para actuar con base en la imagen."*	Agentes capacitados

Categoría: *Factores institucionales*

Consenso. Los perfiles requeridos abarcan pilotaje certificado, análisis de información, mantenimiento, coordinación y agentes capacitados, lo que sustenta el diseño de un plan de capacitación integral (Estrategia 4).

Tabla 17

Matriz de resultados de la entrevista – Pregunta 13. ¿Qué indicadores deberían usarse para evaluar el desempeño del programa?

Part.	Respuesta textual	Características importantes (alineadas con la categoría)
E1	*"El tiempo de respuesta ante incidentes."*	Tiempo de respuesta
E2	*"El porcentaje de incidentes monitoreados en tiempo real."*	Cobertura de monitoreo
E3	*"La velocidad promedio en los corredores intervenidos."*	Velocidad de circulación
E4	*"La relación costo-beneficio del programa."*	Costo-efectividad
E5	*"La satisfacción de los ciudadanos atendidos."*	Satisfacción ciudadana

Categoría: *Eficacia operativa*

Consenso. Los indicadores propuestos por los participantes coinciden con los cuatro indicadores clave del estudio más la costo-efectividad y la satisfacción ciudadana, fundamentando los mecanismos de evaluación (Estrategia 5).

Tabla 18

Matriz de resultados de la entrevista – Pregunta 14. ¿Qué condiciones normativas locales sugiere incorporar?

Part.	Respuesta textual	Características importantes (alineadas con la categoría)
E1	*"Un acto administrativo que regule la operación local."*	Acto administrativo local
E2	*"Protocolos de manejo de datos personales."*	Tratamiento de datos (Ley 1581)

Part.	Respuesta textual	Características importantes (alineadas con la categoría)
E3	*"Zonas y horarios autorizados de vuelo."*	Zonas y horarios de operación
E4	*"Responsabilidades claras entre las entidades."*	Responsabilidades interinstitucionales
E5	*"Lineamientos de articulación con la Policía y tránsito."*	Articulación con autoridades

Categoría: *Factores institucionales*

Consenso. El consenso indica la necesidad de un acto administrativo municipal que defina operación, tratamiento de datos, zonas, responsabilidades y articulación con autoridades, lo que sustenta la Estrategia 1 (marco normativo local).

La codificación temática del conjunto de respuestas permite consolidar las categorías emergentes en la síntesis de la Tabla 19, que integra los hallazgos de las 14 preguntas.

Tabla 19

Síntesis de categorías temáticas del análisis cualitativo

Cód.	Categoría temática	Hallazgo de consenso	Implicación para la propuesta
C1	Estado actual de la movilidad	Cobertura fija del 60–65%; tiempos >30 min en periferia; saturación por eventos simultáneos.	Justifica la cobertura dinámica complementaria (Estrategias 2 y 3).
C2	Expectativas sobre drones	Reducción de tiempos y ampliación de cobertura; curva de aprendizaje de 6 a 12 meses.	Orienta metas y el plan de capacitación (Estrategia 4).
C3	Factores institucionales y normativos	Principal barrera no tecnológica: vacío normativo local, integración y sostenibilidad.	Fundamenta las Estrategias 1, 3 y 5.
C4	Cobertura y arquitectura	Drones como capa móvil integrada al centro de control con protocolos de despacho.	Sustenta el modelo operativo (Estrategia 3).

Nota. Elaboración propia con base en el corpus de entrevistas (E1–E5) y la revisión documental, usando Taguette como herramienta de soporte para la codificación.

5.1.5 Articulación de los resultados con los objetivos

Este apartado interpreta los hallazgos en función de cada uno de los tres objetivos específicos, integrando las rutas cuantitativa y cualitativa mediante triangulación.

Objetivo específico 1 (falencias y necesidades). El diagnóstico confirmó falencias críticas: tiempos de respuesta de 22 a 29 minutos (M = 25.5), velocidades en hora pico de 13,9–19,1 km/h, congestión promedio del 66,9% (TomTom, 2025) y cobertura de monitoreo predominantemente fija (60–65%, según E3). El análisis cualitativo (categoría C1) reforzó estos hallazgos al evidenciar tiempos superiores a 30 minutos en la periferia y la ausencia de respuesta dinámica. Estos resultados superan los estándares internacionales (HCM, 2022) y validan las hipótesis H1 y H1a.

Objetivo específico 2 (estado de implementación en Bogotá y comparación). La experiencia bogotana mostró mejoras estadísticamente significativas y de gran magnitud práctica ($p < .001$; $r > .90$; $d > 3.0$): reducción del 65% en tiempos de respuesta y aumento del 22% en velocidad de hora pico. Estos resultados son concordantes con Outay et al. (2020), Bisio et al. (2022) y Liu et al. (2023), y con la categoría C4 sobre arquitectura cooperativa. El benchmarking institucional (Spendolini, 1992) confirma la transferibilidad al contexto medellinense y respalda parcialmente la hipótesis H1b.

Objetivo específico 3 (recomendaciones y estrategias). La triangulación fundamenta las cinco estrategias de la propuesta. La categoría C3 identifica la falta de marco normativo local como la principal barrera no tecnológica, en línea con Castro et al. (2022) y con la hipótesis H1c. Los criterios técnicos de Outay et al. (2020) y Coifman et al. (2018) sustentan el dimensionamiento de la flota; Liu et al. (2023) y la categoría C4 sustentan el modelo operativo; la categoría C2 orienta el plan de capacitación; y los indicadores del HCM (2022) junto con la pregunta 13 fundamentan los mecanismos de evaluación.

5.2 Propuesta al sector

A partir de la evidencia comparada, del análisis estadístico y de la consulta institucional, se formula una propuesta dirigida a la Secretaría de Movilidad de Medellín, articulada en cinco estrategias y coherente con el modelo de gerencia de proyectos del sector público (PMI, 2021). Cada estrategia se presenta con su objetivo, sus lineamientos, sus actividades principales, los recursos necesarios y su soporte en los resultados y en la literatura, de modo que se evidencie como una propuesta lograble.

Estrategia 1 – Marco normativo local

Objetivo. Establecer el marco normativo y operativo municipal que habilite y regule la vigilancia con drones en la gestión del tráfico.

Lineamientos. Complementar la Resolución 04230 de 2016 de la UAEAC y la Ley 1581 de 2012 con un acto administrativo municipal que defina zonas y horarios de operación, protocolos de vuelo, responsabilidades interinstitucionales y manejo de datos personales, articulando con las autoridades de tránsito (Ley 769 de 2002).

Actividades principales:

- Conformar una mesa técnica jurídica entre la Secretaría de Movilidad, la Secretaría Jurídica y la UAEAC.
- Redactar y expedir el decreto o resolución municipal de operación de UAS.
- Definir el aviso de privacidad y los protocolos de tratamiento de datos personales.
- Socializar el marco normativo con el personal operativo y la ciudadanía.

Recursos necesarios. Equipo jurídico, asesoría aeronáutica, tiempo institucional (estimado 3–4 meses) y recursos de divulgación.

Soporte en resultados y literatura. La categoría C3 y la pregunta 14 de las entrevistas identifican el vacío normativo local como la principal barrera; Castro et al. (2022) confirman que la falta de lineamientos locales es la brecha estructural en ciudades intermedias colombianas.

Estrategia 2 – Dimensionamiento técnico de la flota

Objetivo. Definir la configuración técnica mínima de la flota de drones requerida para la operación en corredores críticos.

Lineamientos. Adoptar una flota inicial de 4 a 6 cuadricópteros con autonomía superior a 30 minutos, cámaras 4K con zoom óptico, transmisión de video en tiempo real y capacidad de operación en condiciones de viento moderado, conforme a los criterios técnicos de la literatura.

Actividades principales:

- Elaborar las especificaciones técnicas de los equipos y baterías de respaldo.
- Definir los corredores prioritarios de despliegue (Av. Las Vegas, Autopista Sur).
- Establecer el esquema de mantenimiento preventivo y reposición.
- Adquirir o contratar la flota mediante el Estatuto de Contratación (Ley 80 de 1993).

Recursos necesarios. Inversión en equipos y baterías, esquema de mantenimiento, software de transmisión y enlace con el centro de control.

Soporte en resultados y literatura. Outay et al. (2020) y Coifman et al. (2018) establecen los requerimientos de autonomía y resolución; la Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá (2020) demostró que una flota inicial modesta logró reducciones del 65% en tiempos de respuesta, evidenciando altos rendimientos marginales.

Estrategia 3 – Modelo operativo articulado con el SIMM

Objetivo. Diseñar el modelo operativo que integre los drones como capa dinámica del Sistema Inteligente de Movilidad.

Lineamientos. Configurar una arquitectura cooperativa en la que el video de los drones se transmita al Centro de Control de Tránsito y se integre con las cámaras CCTV y los lectores ARS, con protocolos que definan los criterios de despacho de un dron ante un incidente.

Actividades principales:

- Definir los protocolos de activación y despacho de drones por tipo de incidente.
- Integrar el video y los datos de los drones a la plataforma del SIMM.
- Implementar un plan piloto de 6 meses en los corredores priorizados.
- Evaluar el piloto y escalar gradualmente a nuevas zonas.

Recursos necesarios. Plataforma de integración, enlaces de comunicación, ajustes al centro de control y personal de coordinación.

Soporte en resultados y literatura. Liu et al. (2023) demuestran que las arquitecturas cooperativas dron–RSU amplían la cobertura en 40%; la categoría C4 y la pregunta 11 confirman el consenso institucional sobre operar los drones como capa móvil integrada; Barmpounakis y Geroliminis (2020) y Castro et al. (2022) respaldan el enfoque gradualista por corredores.

Estrategia 4 – Plan de capacitación

Objetivo. Desarrollar las capacidades del talento humano para la operación, análisis y mantenimiento del sistema de drones.

Lineamientos. Implementar un plan de formación de 120 horas iniciales y 40 horas anuales de actualización, que cubra pilotaje certificado, análisis de información, mantenimiento, protocolos de seguridad e integración con el SIMM, gestionando proactivamente la curva de aprendizaje de 6 a 12 meses.

Actividades principales:

- Identificar y certificar a los pilotos ante la Aeronáutica Civil.
- Capacitar a analistas de información y técnicos de mantenimiento.

- Entrenar a los agentes de tránsito en la actuación basada en imagen.
- Establecer un programa anual de actualización y evaluación de competencias.

Recursos necesarios. Programa de formación certificado, instructores, materiales y tiempo del personal.

Soporte en resultados y literatura. La categoría C2 estima una curva de aprendizaje de 6 a 12 meses; las preguntas 3 y 12 evidencian la diversidad de perfiles requeridos; Zapata y Ortiz (2021) identifican la capacitación como uno de los tres factores críticos de éxito del programa bogotano.

Estrategia 5 – Mecanismos de evaluación basados en indicadores

Objetivo. Implementar un sistema de seguimiento y evaluación del programa con base en indicadores objetivos.

Lineamientos. Definir una línea base previa a la implementación y medir periódicamente los indicadores de tiempo de respuesta, velocidad de circulación, cobertura de monitoreo, costo-efectividad y satisfacción ciudadana, con una meta conservadora de reducción mínima del 30% en el tiempo de respuesta en los primeros 12 meses.

Actividades principales:

- Establecer la línea base de los indicadores antes de la puesta en marcha.
- Definir las metas y el tablero de control de seguimiento.
- Realizar mediciones trimestrales y reportes de avance.
- Ajustar la operación con base en los resultados de la evaluación.

Recursos necesarios. Tablero de control, instrumentos de medición, encuestas de satisfacción y tiempo de análisis.

Soporte en resultados y literatura. Los indicadores estándar del HCM (2022) y la pregunta 13 de las entrevistas fundamentan el tablero; Bernal Torres (2022) señala la línea base

como requisito metodológico; la meta del 30% es conservadora frente al 65% alcanzado por Bogotá (SDM Bogotá, 2020), lo que le confiere realismo y factibilidad.

6. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten establecer un diálogo entre la evidencia empírica y los antecedentes que componen el marco de referencia. En primer lugar, los datos comparativos y estadísticos respaldan los argumentos de la literatura sobre la eficacia operativa de los drones: la reducción del 65% en los tiempos de respuesta a choques simples en Bogotá (SDM Bogotá, 2020) se ubica dentro del rango del 50% al 70% reportado por Outay et al. (2020) en su revisión de 145 estudios, y es coherente con las precisiones de detección superiores al 90% documentadas por Bisio et al. (2022). Asimismo, los hallazgos cualitativos de las entrevistas (categoría C4) confirman el planteamiento de Liu et al. (2023) sobre la conveniencia de arquitecturas cooperativas entre drones y sensores fijos, en tanto los participantes coincidieron en que los UAS deben operar como una capa móvil integrada al SIMM. De este modo, los datos soportan los argumentos centrales de la literatura sobre el potencial de los drones para la gestión del tráfico.

En segundo lugar, el estudio aporta un matiz que complementa y, en parte, contrasta con la literatura internacional. Mientras autores como Barmpounakis y Geroliminis (2020) destacan el potencial analítico de los drones en contextos con congestión moderada, los resultados muestran que Medellín presenta un nivel de congestión sustancialmente más alto (66,9% promedio y picos del 139%, según TomTom, 2025) que el de las ciudades de referencia antes de implementar drones. Esto sugiere que el impacto absoluto sobre la velocidad podría ser proporcionalmente menor si los drones no se acompañan de intervenciones estructurales, un aspecto poco enfatizado en los antecedentes y que constituye un aporte del presente trabajo a la discusión sobre la transferibilidad de la tecnología a ciudades altamente congestionadas.

En tercer lugar, los hallazgos cualitativos respaldan de manera consistente la hipótesis H1c, según la cual la principal barrera no es tecnológica sino institucional y normativa. El consenso de

las entrevistas (categoría C3 y preguntas 10 y 14) identificó el vacío normativo local, la integración técnica y la sostenibilidad como los principales retos, lo que coincide plenamente con el diagnóstico de Castro et al. (2022) sobre las brechas de los Sistemas Inteligentes de Transporte en ciudades intermedias colombianas. Este punto contradice una lectura ingenua según la cual la sola adquisición de equipos resolvería el problema, y refuerza la pertinencia de una propuesta centrada en los factores institucionales, normativos y de capacitación, en línea con los factores críticos de éxito señalados por Zapata y Ortiz (2021).

Finalmente, es necesario reconocer las limitaciones que matizan el alcance de la discusión. Los datos de Medellín «con drones» son proyecciones por analogía con Bogotá y no mediciones empíricas, dado que el programa local apenas se encuentra en fase contractual (Agencia Nacional de Contratación Pública, 2025); el tamaño muestral reducido limita la potencia estadística de las pruebas; y la comparación se concentra en una sola ciudad de referencia. Estas limitaciones, lejos de invalidar los hallazgos, abren oportunidades para futuras investigaciones que validen empíricamente los resultados una vez el programa entre en operación y que amplíen el análisis a otras experiencias nacionales e internacionales, fortaleciendo así la validez externa de la propuesta.

7. CONCLUSIONES

El proceso investigativo alcanzó sus propósitos metodológicos con rigor y coherencia. La codificación sistemática de los datos —cuantitativos y cualitativos— resultó indispensable para transformar la información recolectada en hallazgos interpretables y comparables, tal como lo establece Bernal Torres (2022). A continuación se presenta una conclusión por cada uno de los objetivos específicos, una conclusión asociada a los resultados y a las cifras obtenidas, y una conclusión referida a la propuesta formulada.

Sobre el primer objetivo específico. El diagnóstico confirmó que la gestión del tráfico en Medellín presenta falencias críticas en los cuatro indicadores analizados: tiempos de respuesta entre 22 y 29 minutos (M = 25.5), velocidades en hora pico de 13,9–19,1 km/h, congestión promedio del 66,9% y una cobertura de monitoreo predominantemente fija. Estas cifras, que superan ampliamente los estándares internacionales (HCM, 2022), evidencian la necesidad objetiva de dotar al sistema de capacidad de respuesta dinámica.

Sobre el segundo objetivo específico. La experiencia de Bogotá demostró mejoras estadísticamente significativas y de gran magnitud práctica ($p < .001$; $r > .90$; $d > 3.0$) en todos los indicadores, con una reducción del 65% en tiempos de respuesta a choques simples y un aumento del 22% en velocidad de hora pico. El benchmarking institucional confirma que estos resultados constituyen una prueba de concepto válida y transferible al contexto medellinense, dada la similitud del marco normativo nacional y de la organización institucional de las secretarías de movilidad.

Sobre el tercer objetivo específico. La triangulación de la evidencia cuantitativa y cualitativa permitió elaborar una propuesta de cinco estrategias —marco normativo local, dimensionamiento técnico, modelo operativo articulado con el SIMM, plan de capacitación y

mecanismos de evaluación—, cada una soportada en los resultados obtenidos y en casos de éxito documentados. Se concluye que la implementación de vigilancia con drones en Medellín es técnica, normativa y operativamente factible, siempre que se atiendan de manera prioritaria los factores institucionales y normativos identificados como la principal barrera (hipótesis H1c).

Sobre los resultados obtenidos. Las cifras analizadas evidencian una brecha significativa y estadísticamente comprobable entre Medellín y Bogotá. El análisis en JASP arrojó diferencias significativas ($p < .001$) con tamaños del efecto grandes ($r > .90$; $d > 3.0$) en los indicadores de tiempo de respuesta, velocidad de circulación y cobertura de monitoreo. La reducción del 65% lograda por Bogotá y la línea base actual de Medellín (25.5 minutos de respuesta promedio y 66,9% de congestión) confirman que existe un margen de mejora superior al 30% atribuible a la incorporación de drones, lo que respalda las hipótesis H1, H1a y H1b.

Sobre la propuesta realizada. La propuesta al sector no constituye un ejercicio teórico, sino una hoja de ruta lograble y coherente con el modelo de gerencia de proyectos del sector público (PMI, 2021). Cada estrategia define objetivos, lineamientos, actividades, recursos y soporte en la evidencia, y establece una meta conservadora y realista (reducción mínima del 30% en el tiempo de respuesta en los primeros 12 meses). Se concluye que la propuesta es viable, pertinente y oportuna, en tanto coincide con el proceso de incorporación de drones que la Secretaría de Movilidad de Medellín ya inició formalmente (Agencia Nacional de Contratación Pública, 2025), y puede servir de referencia para otras ciudades intermedias del país.

8. RECOMENDACIONES

A partir de los hallazgos y de la propuesta formulada, se presentan las siguientes recomendaciones dirigidas a la Secretaría de Movilidad de Medellín y a los tomadores de decisión en política pública de movilidad.

- Expedir un acto administrativo municipal que defina el marco operativo local de la vigilancia con drones (zonas de operación, protocolos, responsabilidades y tratamiento de datos personales), complementando la Resolución 04230 de 2016 de la UAEAC y la Ley 1581 de 2012.
- Iniciar la implementación de manera gradual mediante un proyecto piloto en corredores críticos previamente caracterizados (Av. Las Vegas y Autopista Sur), con una flota inicial de 4 a 6 cuadricópteros, antes de escalar a toda la ciudad.
- Articular operativamente los drones con el SIMM y su Centro de Control de Tránsito, integrando la información aérea con la red de cámaras CCTV y lectores ARS para conformar una arquitectura cooperativa dron-sistema fijo.
- Establecer una línea base rigurosa de los cuatro indicadores antes de la puesta en marcha, con el fin de medir el impacto real del programa y permitir comparaciones válidas y confiables.
- Diseñar y ejecutar un plan de capacitación certificado (120 horas iniciales y 40 anuales de actualización) que cubra pilotaje, protocolos de seguridad e integración tecnológica, gestionando proactivamente la curva de aprendizaje de 6 a 12 meses.
- Complementar el uso de drones con intervenciones estructurales (semaforización inteligente, gestión de carriles preferenciales y de la demanda de transporte público),

dado el alto nivel de congestión de Medellín, para maximizar el impacto sobre la velocidad y la congestión.

- Promover futuras investigaciones que validen empíricamente los resultados proyectados una vez el programa entre en operación, y que amplíen el análisis comparativo a otras experiencias nacionales e internacionales.

Referencias

Agencia Nacional de Contratación Pública – Colombia Compra Eficiente. (2025, 10 de julio). Servicio de monitoreo y seguimiento bajo el uso de sistemas de aeronaves no tripuladas — UAS (drones) como apoyo a la captura de información en vía para la Secretaría de Movilidad de Medellín. SECOP II. https://community.secop.gov.co

Agencia Nacional de Seguridad Vial. (2023). Anuario nacional de seguridad vial 2022. Ministerio de Transporte de Colombia. https://ansv.gov.co

Alcaldía de Medellín. (2023). Dataset: Incidentes de tránsito en Medellín 2018–2023. Portal de Datos Abiertos de Medellín. https://datos.medellin.gov.co

Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2022). Encuesta origen-destino de hogares del Valle de Aburrá 2022. AMVA. https://www.metropol.gov.co

Asociación Médica Mundial. (2013). Declaración de Helsinki: Principios éticos para las investigaciones médicas en seres humanos. AMM.

Barmpounakis, E., & Geroliminis, N. (2020). On the new era of urban traffic monitoring with massive drone data: The pNEUMA large-scale field experiment. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 111, 50–71. https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.11.023

Bernal Torres, C. A. (2022). Descripción y análisis de resultados. En Metodología de la investigación (p. 303). Pearson Educación.

Bisio, I., Garibotto, C., Haleem, H., Lavagetto, F., & Sciarrone, A. (2022). A Systematic Review of Drone Based Road Traffic Monitoring System. IEEE Access, 10, 101537–101555. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3207282

Bouskela, M., Casseb, M., Bassi, S., De Luca, C., & Facchina, M. (2016). La ruta hacia las smart cities: Migrando de una gestión tradicional a la ciudad inteligente. Banco Interamericano de Desarrollo.

Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. Qualitative Research in Psychology, 3(2), 77–101. https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa

Camp, R. C. (1989). Benchmarking: The search for industry best practices that lead to superior performance. ASQC Quality Press.

Canal Capital. (2020, 15 de septiembre). Así funcionan los drones que vigilan la accidentalidad en las vías de Bogotá. CanalCapital.gov.co. https://www.canalcapital.gov.co

Castro, J., Pérez, M., & Ramírez, A. (2022). Sistemas Inteligentes de Transporte en ciudades intermedias colombianas: estado del arte y retos. Ingeniería y Universidad, 26, 1–22.

Coifman, B., McCord, M., Mishalani, R. G., Iswalt, M., & Ji, Y. (2018). Roadway Traffic Monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle. Transportation Research Record, 2672(33), 119–129. https://doi.org/10.1177/0361198118791403

Congreso de la República de Colombia. (1991). Constitución Política de Colombia. Gaceta Constitucional N.° 116.

Congreso de la República de Colombia. (1993). Ley 105 de 1993: Por la cual se dictan disposiciones básicas sobre el transporte. Diario Oficial N.° 41.147.

Congreso de la República de Colombia. (1993). Ley 80 de 1993: Estatuto General de Contratación de la Administración Pública. Diario Oficial N.° 41.094.

Congreso de la República de Colombia. (2002). Ley 769 de 2002: Código Nacional de Tránsito Terrestre. Diario Oficial N.° 44.897.

Congreso de la República de Colombia. (2007). Ley 1150 de 2007: Por medio de la cual se introducen medidas para la eficiencia y la transparencia en la Ley 80 de 1993. Diario Oficial N.° 46.691.

Congreso de la República de Colombia. (2012). Ley 1581 de 2012: Disposiciones generales para la protección de datos personales. Diario Oficial N.° 48.587.

Congreso de la República de Colombia. (2014). Ley 1712 de 2014: Transparencia y del derecho de acceso a la información pública nacional. Diario Oficial N.° 49.084.

El Tiempo. (2017, 4 de mayo). Utilizan drones para atender accidentes. El Tiempo. https://www.eltiempo.com

Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (6.ª ed.). McGraw-Hill.

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw-Hill.

Hidalgo, D., & Sandoval, E. (2022). Gestión de la movilidad urbana en América Latina. CAF – Banco de Desarrollo de América Latina.

Highway Capacity Manual. (2022). HCM 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis. Transportation Research Board.

ITE – Institute of Transportation Engineers. (2022). Intelligent Transportation Systems Handbook. ITE Press.

JASP Team. (2024). JASP (Versión 0.18) [Software estadístico]. Universidad de Ámsterdam. https://jasp-stats.org

Kanistras, K., Martins, G., Rutherford, M. J., & Valavanis, K. P. (2015). A Survey of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Traffic Monitoring. En Handbook of Unmanned Aerial Vehicles (pp. 2643–2666). Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1_122

Khan, M. A., Ectors, W., Bellemans, T., Janssens, D., & Wets, G. (2017). UAV-Based Traffic Analysis: A Universal Guide for Different Applications. Sustainability, 9(7), 1276. https://doi.org/10.3390/su9071276

Litman, T. (2023). Smart transportation emission reduction strategies. Victoria Transport Policy Institute.

Liu, X., Wang, Y., Zhang, J., & Chen, S. (2023). Cooperative UAV-Roadside Unit Networks for Traffic Surveillance: Architecture and Performance Analysis. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 152, 104167. https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104167

Ministerio de Transporte de Colombia. (2023). Cifras del parque automotor nacional 2022. Ministerio de Transporte. https://www.mintransporte.gov.co

Organización Mundial de la Salud. (2023). Global status report on road safety 2023. OMS. https://www.who.int

Outay, F., Mengash, H. A., & Adnan, M. (2020). Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 141, 116–129. https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.09.018

Project Management Institute. (2021). Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK®) (7.ª ed.). PMI.

Resnik, D. B. (2018). The ethics of research with human subjects: Protecting people, advancing science, promoting trust. Springer.

RUNT – Registro Único Nacional de Tránsito. (2023). Estadísticas de accidentalidad vial por municipio: Medellín. RUNT. https://www.runt.com.co

Secretaría de Movilidad de Medellín. (2023a). Anuario de estadísticas de movilidad 2022. Alcaldía de Medellín. https://www.medellin.gov.co

Secretaría de Movilidad de Medellín. (2023b). Informe de accidentalidad vial de Medellín 2022. Alcaldía de Medellín. https://www.medellin.gov.co

Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá. (2020, 21 de octubre). Con drones, se reducirá a 7 minutos el tiempo de respuesta de los choques simples en Bogotá. https://www.movilidadbogota.gov.co

Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá. (2022). Informe de gestión 2022. Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. https://www.movilidadbogota.gov.co

Sistema Inteligente de Movilidad de Medellín – SIMM. (2024). Componentes del SIMM: CCTV, ARS y Centro de Control de Tránsito. Alcaldía de Medellín. https://www.medellin.gov.co

Spendolini, M. J. (1992). The benchmarking book. AMACOM.

Telemedellín. (2024). Se reduce tiempo en atención de incidentes de tránsito. Telemedellín TV. https://telemedellin.tv

TomTom. (2025). Medellín traffic report 2024. TomTom Traffic Index. https://www.tomtom.com/traffic-index

Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2016). Resolución 04230 de 2016: Requisitos para la operación de aeronaves pilotadas a distancia (drones). Aeronáutica Civil de Colombia.

UN-Habitat. (2020). Smart mobility for cities. United Nations Human Settlements Programme. https://unhabitat.org

Zapata, M. E., & Ortiz, J. D. (2021). Evaluación del uso de drones en la gestión del tráfico urbano: estudio de caso en Bogotá. Revista de Transporte y Logística Urbana, 14(2), 55–68.

Anexos

Anexo A. Formato de Consentimiento Informado

Yo, _____, identificado(a) con documento de identidad N.° _____, manifiesto que he sido informado(a) de manera clara y suficiente sobre el proyecto de investigación titulado «Propuesta de estrategias para la implementación de vigilancia mediante drones que permitan mejorar la gestión del tráfico vehicular en Medellín», adelantado por los estudiantes Jhonny Alexander Metaute y Sara Lorduy Hernández de la Especialización en Gerencia de Proyectos de la Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO, bajo la asesoría del Dr. Sergio Andrés Zabala Vargas.

Comprendo que mi participación consiste en responder una entrevista semiestructurada de aproximadamente 40 minutos, la cual será grabada con fines exclusivamente académicos y transcrita posteriormente. Conozco que la información será tratada bajo estricta confidencialidad, en cumplimiento de la Ley 1581 de 2012 de Protección de Datos Personales, que mis datos personales serán anonimizados y que los resultados se presentarán únicamente de forma agregada. Tengo conocimiento de que mi participación es voluntaria y que puedo retirarme en cualquier momento sin consecuencia alguna.

En constancia de lo anterior, firmo el presente consentimiento de manera libre y voluntaria.

Firma: _____ Fecha: _____

Contacto del investigador principal: _____

Anexo B. Guía de Entrevista Semiestructurada

Bloque 1. Perfil y vinculación institucional

- ¿Cuál es su cargo actual y desde hace cuánto tiempo se vincula a procesos de gestión del tráfico vehicular?
- ¿En qué procesos específicos del SIMM o de la Secretaría de Movilidad participa?
- ¿Qué formación académica o técnica tiene en gestión de movilidad o tecnología?

Bloque 2. Diagnóstico institucional del estado actual

- ¿Cuáles considera son las principales limitaciones actuales del sistema de monitoreo vial en Medellín?
- ¿Qué tipo de incidentes son los más complejos de atender desde el punto de vista del tiempo de respuesta?
- ¿Cómo se articula actualmente el SIMM con los agentes de tránsito en terreno?
- ¿Qué fortalezas considera tiene el sistema actual de monitoreo?

Bloque 3. Expectativas sobre el uso de drones

- ¿Conoce los planes de la Secretaría de incorporar drones para la gestión vial?
- ¿Cuáles son las principales expectativas de la institución frente a esta tecnología?
- ¿Qué riesgos o retos identifica en su implementación?
- ¿Cómo cree que los drones podrían articularse con el SIMM existente?

Bloque 4. Recomendaciones para la implementación

- ¿Qué perfiles de personal considera necesarios para operar drones?
- ¿Qué indicadores deberían usarse para evaluar el desempeño del programa?
- ¿Qué condiciones normativas locales sugiere se incorporen?