

La información sobre el estado de tráfico y su rol en la redistribución de flujos.

Caso de estudio: área metropolitana de Bucaramanga

Claudia Patricia Báez Trujillo

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de Magister en Ingeniería

Civil - Línea de profundización movilidad y transporte

Director

Hernán Porras Díaz

Ph.D.

Codirector

Yerly Fabián Martínez Estupiñan.

Ph.D. (C)

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría En Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

## Tabla de contenido

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| 1. Introducción.....  | 15          |
| 2. Objetivos .....  | 19          |
| 2.1. Objetivo General .....   | 19          |
| 2.2. Objetivos Específicos .....  | 19          |
| 3. Definición de los criterios de penetración de la información suministrada al viajero .....   | 20          |
| 3.1. Identificación de tecnologías y supuestos del comportamiento del conductor ante el suministro de información de rutas de viaje .....               | 20          |
| 3.1.1. Identificación de las variables que influyen en la decisión de ruta de un conductor. ....  | 21          |
| 3.1.2. Tecnologías de la información usadas para el suministro de información de tráfico ....   | 26          |
| 3.2. Medición de la tasa de aceptación de información de tráfico .....  | 29          |
| 3.2.1. Definición de variables que influyen en la decisión de la elección de ruta .....   | 30          |
| 3.2.2. Construcción e implementación del instrumento de medición .....  | 32          |
| 3.2.2.1. Consideraciones principales del proceso de muestreo.....   | 33          |
| 3.2.2.2. Consideraciones sobre el tamaño de la muestra .....  | 36          |
| 3.2.2.3. Diseño del instrumento de medición.....  | 40          |
| 3.2.2.4. Aplicación del instrumento de medición. ....   | 43          |
| 3.3. Estimación de las tasas de aceptación o desobediencia de la información de tráfico para los conductores del área metropolitana de Bucaramanga..... | 47          |
| 3.3.1. Revisión, preparación y verificación de la información recolectada.....  | 48          |
| 3.3.2. Análisis de la información .....   | 52          |

|   |     |
|---|-----|
| 3.3.3. Definición de las tasas de aceptación de información de tráfico por parte del conductor para el caso de estudio del área metropolitana de Bucaramanga..... | 54  |
| 3.4. Resultados .....   | 57  |
| 3.4.1. Resultados de la preparación y verificación de la información recolectada. ....  | 58  |
| 3.4.2. Validación .....   | 59  |
| 3.4.3. Análisis general de la información recopilada. ....  | 61  |
| 3.4.4. Análisis de la información de comportamiento del usuario frente las ATIS a partir de las características generales de la muestra. ....                     | 79  |
| 3.4.5. Análisis bi-variado de la información.....   | 90  |
| 3.4.6. Definición de las tasas de aceptación de información de tráfico por parte de los conductores del área metropolitana de Bucaramanga.....                    | 105 |
| 3.5. Conclusiones definición de criterios de penetración de información.....  | 108 |
| 4. Construcción de un modelo de meso-simulación para el área metropolitana de Bucaramanga   | 113 |
| 4.1. Preparación de los insumos requeridos para la construcción del modelo de simulación....  | 113 |
| 4.1.1. Actualización de la oferta de transporte del área metropolitana de Bucaramanga. ....   | 114 |
| 4.1.1.1. Actualización de la información secundaria disponible de la malla vial del área metropolitana de Bucaramanga.....  | 114 |
| 4.1.1.2. Definición de una red análoga de transporte para el desarrollo de la modelación .  | 118 |
| 4.1.2. Actualización de la demanda de viajes para el área metropolitana de Bucaramanga..  | 133 |
| 4.1.2.1. Información secundaria disponible de las zonas de análisis de transporte base del área metropolitana de Bucaramanga.....                                 | 134 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 4.1.2.2. | Información secundaria disponible de la matriz semilla del área metropolitana de Bucaramanga.....  | 134 |
| 4.1.2.3. | Actualización de las zonas de análisis de transporte definidas para el modelo de simulación.   | 136 |
| 4.1.2.4. | Actualización de la demanda definida para el modelo de simulación .....  | 138 |
| 4.1.2.5. | Levantamiento de Información actualizada para el ajuste, validación y calibración del modelo de simulación .....                         | 144 |
| 4.2.     | Construcción del modelo de simulación para el área metropolitana de Bucaramanga .....  | 147 |
| 4.2.1.   | Montaje de un modelo dinámico en un entorno de simulación mesoscópico.....   | 147 |
| 4.2.1.1. | Selección de la herramienta de simulación.....   | 147 |
| 4.2.1.2. | Selección la escala de simulación .....  | 148 |
| 4.2.1.3. | Selección del método de asignación para la simulación.....   | 149 |
| 4.2.1.4. | Selección del método de elección de ruta .....   | 151 |
| 4.2.1.5. | Conformación del modelo de simulación base. ....   | 156 |
| 4.2.2.   | Calibración y validación del Modelo de simulación.....   | 160 |
| 4.3.     | Resultados .....   | 165 |
| 4.3.1.   | Preparación de los insumos requeridos para la construcción del modelo de simulación  | 165 |
| 4.3.1.1. | Actualización de la oferta de transporte.....  | 165 |
| 4.3.1.2. | Actualización de la demanda de viajes. ....  | 172 |
| 4.3.2.   | Construcción del modelo mesoscópico para simular el efecto de la penetración de la información en el estado de tráfico de la ciudad..... | 182 |
| 4.3.2.1. | Validación y calibración del modelo de simulación. ....  | 182 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.3.2.2. Resultados obtenidos del modelo dinámico en un entorno de simulación microscópico.....   | 187 |
| 4.4. Conclusiones de la construcción del modelo de mesosimulación.....  | 189 |
| 5. Determinar del impacto de la penetración de la información suministrada al usuario en la redistribución de los flujos en una red ..... | 194 |
| 5.1. Escenarios de evaluación de los efectos de la información al viajero en la redistribución de los viajes en el área de estudio.....   | 194 |
| 5.2. Análisis de los escenarios de evaluación de suministro de información propuestos. ....   | 197 |
| 5.3. Resultados .....   | 199 |
| 5.3.1. Escenario principal V/S escenario con implementación de incidentes.....  | 200 |
| 5.3.1.1. Resultados obtenidos para el análisis a nivel de red global .....  | 201 |
| 5.3.1.2. Resultados a nivel de la zona de influencia de aplicación del incidente .....  | 207 |
| 5.3.2. Evaluación de los escenarios de penetración de la información propuestos .....   | 212 |
| 5.3.2.1. Resultados obtenidos para el análisis a nivel de red global .....  | 213 |
| 5.3.2.2. Resultados a nivel de la zona de influencia de aplicación del incidente .....  | 221 |
| 5.4. Conclusiones del impacto del suministro de información al usuario.....   | 227 |
| 6. Conclusiones generales de la investigación. ....   | 233 |
| 7. Consideraciones finales.....   | 235 |
| 8. Recomendaciones.....   | 236 |

## Lista de Tablas

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Tabla 1 <i>Selección final de las variables a medir.</i> .....  | 31          |
| Tabla 2 <i>Escenarios de suministro de información propuesto para la evaluación.</i> .....                                  | 56          |
| Tabla 3 <i>Número de encuestados por municipio del área metropolitana de Bucaramanga</i> .....                              | 64          |
| Tabla 4 <i>Parque automotor matriculado en el área metropolitana de Bucaramanga</i> .....                                   | 65          |
| Tabla 5 <i>Listado de variables para procesamiento.</i> .....   | 90          |
| Tabla 6 <i>Análisis de distribución bi-variado.</i> .....   | 92          |
| Tabla 7 <i>Tabla de contingencia variables V9 y V16.</i> .....  | 94          |
| Tabla 8 <i>Diferencias entre los perfiles porcentuales de las variables V9 y V16.</i> .....                                 | 95          |
| Tabla 9 <i>Tabla de contingencia variables V14 y V16</i> .....  | 96          |
| Tabla 10 <i>Diferencias entre los perfiles porcentuales de las variables V14 y V16.</i> .....                               | 96          |
| Tabla 11 <i>Resultados del análisis de asociación por Chi cuadrado de las variables de interés.</i> ..                      | 97          |
| Tabla 12 <i>Atributos de interés asociados a la malla vial del área metropolitana de Bucaramanga.</i><br>.....              | 115         |
| Tabla 13 <i>Atributos asignados a la malla vial actualizada.</i> .....  | 116         |
| Tabla 14 <i>Homologación de la jerarquización vial para el municipio de Floridablanca.</i> .....                            | 120         |
| Tabla 15 <i>Velocidades asignadas a la red simplificada.</i> .....  | 124         |
| Tabla 16 <i>Factores de equivalencia seleccionados para la definición de los vehículos equivalentes.</i><br>.....           | 126         |
| Tabla 17 <i>Valores de <math>\alpha</math> y <math>\beta</math> definidos por Fehr &amp; Peers (2010).</i> .....            | 131         |
| Tabla 18 <i>Asignación de parámetros <math>\alpha</math> y <math>\beta</math>, según jerarquización metropolitana</i> ..... | 132         |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 19 <i>Información contenida en los archivos de referencia.</i> .....  | 137 |
| Tabla 20 <i>Comparación de métodos de asignación de ruta para la implementación en el modelo de simulación</i> .....        | 154 |
| Tabla 21 <i>Ejemplo del levantamiento de información de fases y tiempos semafóricos</i> .....                               | 172 |
| Tabla 22 <i>Velocidades simuladas y observadas tramo Carrera 33 entre calle 36 y Cacique</i> ....                           | 184 |
| Tabla 23 <i>Velocidades simuladas y observadas tramo Carrera 27 entre calle 36 y Cañaveral</i>                              | 184 |
| Tabla 24 <i>Valores de GEH obtenidos para las subredes estudiadas</i> .....   | 185 |
| Tabla 25 <i>Resultados derivados del modelo de simulación ejecutado</i> .....   | 187 |
| Tabla 26 <i>Resultados de velocidades para cada uno de los escenarios de penetración de la información propuestos</i> ..... | 219 |
| Tabla 27 <i>Resultados de velocidades para cada uno de los escenarios de penetración de la información propuestos</i> ..... | 227 |

## Lista de Figuras

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Figura 1 <i>Variables de decisión de los conductores</i> .....   | 22          |
| Figura 2 <i>Diagrama de la estructura propuesta para la encuesta</i> .....   | 41          |
| Figura 3 <i>Ubicación de los puntos en donde se realizaron las entrevistas</i> .....   | 44          |
| Figura 4 <i>Diagrama del procedimiento para la ejecución de entrevistas</i> .....  | 46          |
| Figura 5 <i>Distribución espacial de la ubicación de las viviendas de los conductores encuestados</i> .<br>.....             | 60          |
| Figura 6 <i>Distribución por rango de edad</i> .....   | 62          |
| Figura 7 <i>Composición de la muestra en estudio por ocupación</i> .....   | 62          |
| Figura 8 <i>Composición de la muestra en estudio por escolarización</i> .....  | 63          |
| Figura 9 <i>Composición de la muestra en estudio por estrato</i> .....   | 64          |
| Figura 10 <i>Población por Municipio y Género (2018)</i> .....   | 66          |
| Figura 11 <i>Diagrama a de flujo que presenta las respuestas asociadas a la fase 2 de la encuesta</i> .<br>.....             | 69          |
| Figura 12 <i>Principales dispositivos o aplicaciones usadas por los encuestados para consultar información de ruta</i> ..... | 71          |
| Figura 13 <i>Razones por las cuales los encuestados realizan consultas de información de tráfico</i> .<br>.....              | 72          |
| Figura 14 <i>Habitualidad en la consulta de información de los encuestados</i> .....   | 73          |
| Figura 15 <i>Razones por las cuales los encuestados modifican su ruta</i> .....  | 74          |
| Figura 16 <i>Motivo por el cual no consulta la información</i> .....   | 77          |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 17 <i>Motivo por el cual no consulta la información.</i> .....  | 79  |
| Figura 18 <i>Distribución de frecuencia de viajes semanales por edad.</i> .....  | 80  |
| Figura 19 <i>Comportamiento del uso de la información de ruta por rango de edades.</i> .....   | 81  |
| Figura 20 <i>Habitualidad de consulta de información para efectuar los desplazamientos por rangos de edad.</i> .....   | 82  |
| Figura 21 <i>Momento durante el viaje en que se consulta la información de tráfico por nivel socioeconómico.</i> .....   | 84  |
| Figura 22 <i>Momento en que consulta la información de ruta por edades.</i> .....  | 85  |
| Figura 23 <i>Frecuencia de aceptación por rango de edades de las instrucciones dadas por los dispositivos que entregan información de ruta.</i> .....                | 86  |
| Figura 24 <i>Motivo por el cual los conductores no consultan información sobre rutas alternas para efectuar sus desplazamientos, por edades.</i> .....               | 87  |
| Figura 25 <i>Motivo por el cual los conductores no consultan información sobre rutas alternas para efectuar sus desplazamientos, por nivel socioeconómico.</i> ..... | 88  |
| Figura 26 <i>Disposición a modificar su ruta por rangos de edades</i> .....  | 89  |
| Figura 27 <i>Relación entre las respuestas de las variables V9 y V11.</i> .....  | 100 |
| Figura 28 <i>Relación entre las respuestas de las variables V9 y V15.</i> .....  | 101 |
| Figura 29 <i>Relación entre las respuestas de las variables V15 y V10</i> .....  | 104 |
| Figura 30 <i>Levantamiento de fases y tiempos semafóricos.</i> .....   | 133 |
| Figura 31 <i>Puntos de recuentos de flujo en los segmentos de red del área metropolitana de Bucaramanga.</i> .....   | 145 |
| Figura 32 <i>Principales corredores usados para la medición de velocidades en el área metropolitana de Bucaramanga.</i> .....  | 146 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 33 <i>Jerarquización de la red vial base</i> .....  | 167 |
| Figura 34 <i>Jerarquización de la red vial análoga</i> .....   | 168 |
| Figura 35 <i>Flujo vehicular asignado por sentido de circulación asignado a la red vial análoga</i><br>.....   | 169 |
| Figura 36 <i>Velocidad de operación asignada a la red vial análoga</i> .....   | 170 |
| Figura 37 <i>Elementos de control de tráfico ubicados sobre la red análoga del área de estudio</i>   | 171 |
| Figura 38 <i>Zonificación base V/S Zonificación DANE 2027</i> .....  | 174 |
| Figura 39 <i>Zonificación base V/S Zonificación actualizada</i> .....  | 175 |
| Figura 40 <i>Comparación entre la Demanda base y la demanda ajustada, experimento F&amp;W.</i>   | 176 |
| Figura 41 <i>Comparación entre los flujos proyectados y los flujos de referencia para la demanda base y la demanda ajustada, experimento F&amp;W</i> ..... | 178 |
| Figura 42 <i>Comparación entre la Demanda base y la demanda ajustada, experimento ToN</i> ....   | 179 |
| Figura 43 <i>Comparación entre los flujos proyectados y los flujos de referencia para la demanda base y la demanda ajustada, experimento ToN.</i> .....    | 180 |
| Figura 44 <i>Análisis de regresión realizado al modelo de simulación</i> .....   | 183 |
| Figura 45 <i>Representación gráfica resultados del estadístico GEH en los puntos de control</i> ...  | 186 |
| Figura 46 <i>Incidentes simulados en el Área Metropolitana de Bucaramanga</i> .....  | 195 |
| Figura 47 <i>Flujo simulado para la ciudad de Bucaramanga, considerando el escenario principal y el escenario con incidentes y sin información</i> .....   | 202 |
| Figura 48 <i>Velocidad promedio del escenario principal y el escenario con incidentes sin información para la ciudad de Bucaramanga.</i> .....             | 203 |
| Figura 49 <i>Tiempo de viaje del escenario principal y el escenario con incidentes sin información para la ciudad de Bucaramanga.</i> .....                | 205 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 50 <i>Tiempo de demora de simulación del escenario principal y el escenario con incidentes sin información para la ciudad de Bucaramanga.</i> .....                                   | 206 |
| Figura 51 <i>Cola media del escenario principal y el escenario con incidentes sin información para la ciudad de Bucaramanga.</i> .....   | 207 |
| Figura 52 <i>Diagrama de flujo simulado zona de influencia incidente carrera 33 con calle 48, considerando el escenario principal y el escenario con incidentes y sin información.</i> ..... | 209 |
| Figura 53 <i>Velocidad promedio del escenario principal y el escenario con incidentes sin información zona de influencia carrera 33 con calle 48.</i> .....                                  | 210 |
| Figura 54 <i>Tiempo de demora del escenario principal y el escenario con incidentes sin información zona de influencia carrera 33 con calle 48.</i> .....                                    | 211 |
| Figura 55 <i>Cola Media del escenario principal y el escenario con incidentes sin información zona de influencia carrera 33 con calle 48.</i> .....  | 211 |
| Figura 56 <i>Tiempo de viaje del escenario principal y el escenario con incidentes sin información zona de influencia carrera 33 con calle 48.</i> .....                                     | 212 |
| Figura 57 <i>Velocidad promedio según el porcentaje de información aceptado por el usuario, para la ciudad de Bucaramanga.</i> .....   | 215 |
| Figura 58 <i>Tiempo de demora según el porcentaje de información aceptado por el usuario, para la ciudad de Bucaramanga.</i> .....   | 216 |
| Figura 59 <i>Cola media según el porcentaje de información aceptado por el usuario, para la ciudad de Bucaramanga.</i> .....   | 217 |
| Figura 60 <i>Tiempo de viaje según el porcentaje de información aceptado por el usuario, para la ciudad de Bucaramanga.</i> .....  | 218 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 61 <i>Velocidad de los escenarios estudiados según el porcentaje de información aceptado por el usuario, zona de influencia carrera 33 con calle 48.</i> .....        | 222 |
| Figura 62 <i>Tiempo de demora de los escenarios estudiados según el porcentaje de información aceptado por el usuario, zona de influencia carrera 33 con calle 48.</i> ..... | 223 |
| Figura 63 <i>Cola Media de los escenarios estudiados según el porcentaje de información aceptado por el usuario, zona de influencia carrera 33 con calle 48.</i> .....       | 224 |
| Figura 64 <i>Tiempo de viaje de los escenarios estudiados según el porcentaje de información aceptado por el usuario, zona de influencia carrera 33 con calle 48.</i> .....  | 226 |

## Resumen

**Título:** La información sobre el estado de tráfico y su rol en la redistribución de flujos. Caso de estudio: Área Metropolitana de Bucaramanga.\*

**Autor:** Claudia Patricia Báez Trujillo\*\*

**Palabras Clave:** Sistemas Avanzados de Información al Viajero (ATIS), Asignación Dinámica, Elección de Ruta Estocástica, Análisis de sensibilidad

**Descripción:** La búsqueda de soluciones para mitigar los efectos de la congestión en las ciudades ha permitido identificar tecnologías de la información como los sistemas avanzados de información al viajero (ATIS por sus siglas en inglés) que son capaces de aliviar la propagación de la congestión mejorando el rendimiento de las redes, a través del suministro de información sobre el estado de tráfico y sugerencias a los usuarios sobre rutas disponibles para efectuar sus desplazamientos. Con el objetivo de estudiar el impacto de los ATIS en el contexto del área metropolitana de Bucaramanga, la presente investigación identificó las variables que afectan la forma en que un conductor realiza la elección de sus rutas influenciado por el suministro de información relacionada con el estado de tráfico de la ciudad. Posteriormente, se construyó un modelo de asignación dinámica de tráfico, con el cual se representaron las condiciones típicas de movilidad del área de estudio, y con base en este se generaron siete escenarios de penetración de información implementando estrategias y políticas orientadas a representar los efectos del suministro de información de tráfico en el rendimiento de la red. Se encontraron evidencias que señalan que la implementación de ATIS producen mejoras significativas en el rendimiento de la red en estudio, sin embargo, para penetraciones superiores a 50% en la red global y de 37% en la red del área de influencia directa, los beneficios obtenidos disminuyen.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Universidad Industrial de Santander. Maestría en Ingeniería Civil. Director: Hernán Porras Díaz. Ph.D. Codirector: Yerly Fabián Martínez Estupiñán. Ph.D (c)

## Abstract

**Title:** Information on traffic conditions and its role in the redistribution of flows. Case study: Bucaramanga metropolitan area \*

**Author(s):** Claudia Patricia Baez Trujillo \*\*

**Key Words:** Advanced Travel Information Systems (ATISs), Dynamic traffic assignment, Stochastic route choice, Sensitivity analysis

**Description:** The search for solutions to mitigate the effects of congestion in cities has made it possible to identify information technologies such as advanced traveler information systems (ATIS) that are capable of alleviating the spread of congestion by improving the performance of traffic networks, by providing information on the state of traffic and suggestions to users on available routes to carry out their journeys. With the objective of studying this assumption in the context of the Bucaramanga metropolitan area, this research identified the variables that affect the way in which a driver chooses his routes influenced by the provided information related to the state of traffic in the city. Subsequently, a dynamic traffic allocation model was built, with which the typical mobility conditions of the study area were represented, and based on this, seven scenarios of information penetration were generated, implementing strategies and policies aimed at representing the effects of provision of traffic information on network performance. Evidence was found that indicates that the implementation of ATIS produces significant improvements in the performance of the traffic network under study, however, for penetrations greater than 50% in the global network and 37% in the network of the area of direct influence, the benefits obtained decrease.

---

\* Degree Work

\*\* Universidad Industrial de Santander. Maestría en Ingeniería Civil. Director: Hernán Porras Díaz. Ph.D. Codirector: Yerly Fabián Martínez Estupiñan. Ph.D (c)

## 1. Introducción

Las externalidades negativas del transporte se han identificado en múltiples urbes a nivel mundial y especialmente en Latinoamérica, evidenciando diferentes problemáticas asociadas principalmente al acelerado crecimiento que han experimentado las pequeñas ciudades, el cual se ha dado de forma desorganizada, exhibiendo las tasas más altas de urbanización de las regiones en vías de desarrollo. Así mismo, este crecimiento no ha estado acompañado por el aumento en inversiones en infraestructura, mantenimiento y servicios públicos, o la aplicación de medidas eficientes de gestión de la demanda, lo cual ha desencadenado problemáticas graves en los sistemas de transporte de las ciudades. (Banco de Desarrollo de América Latina (CAF), 2011; Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2017)

Esta situación ha tenido un impacto importante en los sistemas viales, en donde problemáticas como la congestión vehicular producida por el crecimiento desmedido del parque automotor, ha mostrado una falencia en la infraestructura vial, la cual en muchos momentos del día opera al límite de su capacidad. La congestión en las ciudades aumenta los tiempos de viaje, genera contaminación ambiental y auditiva, y trae implicaciones para la salud de sus habitantes. (Ackaah, 2019)

Las soluciones orientadas a mitigar estas problemáticas se enfocan comúnmente en la construcción de nuevas carreteras y en la ampliación de las existentes, sin embargo, el aumento incesante en la demanda de tráfico, junto con las restricciones presupuestarias, hacen inviable, poco sostenible e ineficiente la implementación de estas soluciones. (Ackaah, 2019; Bagloee, Ceder, & Bozic, 2012) Por esta razón se han desarrollado nuevos enfoques que buscan gestionar la demanda y la oferta de transporte para optimizar el uso de la infraestructura existente.

Algunas de las medidas comúnmente usadas en relación con la gestión de la demanda, incluyen la implementación de restricciones de circulación de vehículos (pico y placa), la tarificación vial por congestión, la redistribución del espacio vial y la instauración de impuestos a la compra y operación de vehículos particulares. (BID, 2020) Otras medidas comúnmente estudiadas en la literatura se orientan a la gestión de la infraestructura existente, optimizando su uso por medio de la implementación de tecnologías de la información dentro de las que sobresalen los Sistemas Avanzados de Información al Viajeros (ATIS por sus siglas en inglés). Estos sistemas se apoyan en los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), los cuales son una estrategia usada entre otras cosas para proporcionar a los viajeros información más precisa y en ocasiones en tiempo real acerca del estado del tráfico, ayudándolos a planificar sus viajes y/u ofrecer alternativas para continuar con su recorrido. (Ackaah, 2019; Sundaram et al., 2011; Hall, 1996)

La presente investigación se centra en la medición del impacto por el uso de las tecnologías ATIS, las cuales permiten a los usuarios usar y compartir su conocimiento, desde su experiencia personal, para la selección de ruta, integrando la información de tráfico disponible de forma que pueden actualizar sus elecciones y obtener una mejor calidad en las recomendaciones para sus recorridos. En la experiencia sin soporte de herramientas ATIS, el usuario realiza su elección con base en su aprendizaje personal sobre el rendimiento de las diferentes opciones de ruta disponibles. (Storch et al., 2020) Las herramientas ATIS disponibles se fundamentan en el principio de brindar opciones de rutas más eficientes a los usuarios y la reducción de la congestión en las ciudades, sin embargo, predecir los beneficios asociados a esta redistribución de flujos, implica un esfuerzo importante, ya que se requiere modelar el comportamiento del viajero en respuesta a la aplicación de las estrategias ATIS. (Sundaram et al., 2011)

Para regiones en desarrollo como América Latina, la introducción de estas tecnologías se ha realizado en forma de sistemas básicos para gestionar el tráfico vial, los cuales incluyen semáforos, sistemas de vigilancia de tráfico mediante circuito cerrado de televisión y ATIS basados en paneles de mensajería variables VMS, según lo planteado por la nota técnica del Banco Mundial titulada “ITS para países en desarrollo” citada por Ackaah (2019). La aplicación de las tecnologías mencionadas se centra sobre las principales arterias y los cruces críticos en las ciudades. Sin embargo, no se presta atención a los beneficios que se obtienen del uso de rutas alternativas, las cuales se derivan de las aplicaciones ATIS, a partir de las cuales es posible que los conductores elijan otras rutas en lugar de las arterias principales congestionadas. (Ackaah, 2019)

Para poder explicar cómo el suministro de información de tráfico modifica las rutas de los viajeros, e influye en el alivio de la propagación de la congestión, es necesario modelar los efectos que tiene la información suministrada a los conductores a través de las ATIS (A. Zhang & Gao, 2012). Esta necesidad de modelación identificada incluye el desarrollo de modelos dinámicos de asignación de tráfico (DTA, por sus siglas en inglés), cuyo alcance en estudios de transporte, se orientan a la operación del tráfico y a los estudios de planificación del transporte. Estos escenarios son particularmente apropiados para estudiar aplicaciones de planificación a corto plazo, que incluyen la simulación de las condiciones de suministro de información, la respuesta de los conductores individuales y el impacto de la diseminación de la información. (Kamga, Mouskos, & Paaswell, 2011)

La presente investigación buscó evaluar los efectos de la aplicación de tecnologías ATIS en una red de transporte, considerando como diferentes grados de penetración de la información

de tráfico, influyen en la redistribución de flujos de una red de transporte, teniendo como caso de estudio el área metropolitana de Bucaramanga.

Para tal fin, se precisó una metodología para definir los criterios que influyen en la elección de ruta por parte de los conductores, dentro de la cual se realizó una revisión bibliográfica que señala las tecnologías disponibles, informando sobre sus beneficios y deficiencias en su implementación, así mismo se muestra la identificación de las variables que influyen en la elección de ruta de los conductores y su intención de consultar y usar la información de tráfico disponible y se definieron las tasas de aceptación o desobediencia que tiene los conductores frente al suministro de información de tráfico, relacionando las conclusiones arrojadas del desarrollo de esta. Esta información se presenta en el *Capítulo 3* del presente documento.

El *Capítulo 4* presenta los resultados obtenidos de la simulación de la situación típica realizada para el área metropolitana de Bucaramanga, en la cual se relaciona la metodología propuesta para la preparación de los insumos de oferta y demanda, la selección del algoritmo de asignación dinámico que se ajustó a las condiciones de la red, y el proceso de calibración y validación del modelo de simulación. Finalmente, el *Capítulo 5* relaciona el impacto que produce la penetración de la información de tráfico en la red en estudio, relacionando los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones considerando las tasas de aceptación definidas. Así mismo se presenta el análisis de sensibilidad realizado, a partir del cual se evaluó la variación en la respuesta del modelo. Las conclusiones derivadas del desarrollo de la investigación se encuentran al finalizar cada uno de los capítulos mencionados y al finalizar el documento se presentan las conclusiones, consideraciones y recomendaciones obtenidas de la investigación.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo General**

Identificar como diferentes grados de penetración de información suministrada al usuario de una red de transporte acerca del estado del tráfico, influye sobre la redistribución de los flujos de una red de transporte.

### **2.2. Objetivos Específicos**

Definir los criterios de penetración de la información suministrada al viajero que influyen en la elección de rutas disponibles tomando en cuenta el estado del tráfico.

Simular el efecto de la penetración de la información del estado de tráfico del área metropolitana de Bucaramanga, sobre la distribución de los flujos de la red de transporte, mediante un modelo de meso-simulación, considerando al menos 3 escenarios de simulación que contemplen diferentes valores de cobertura de la información.

Determinar el impacto que produce la penetración de la información suministrada al usuario en la redistribución de los flujos de la red de transporte del área metropolitana de Bucaramanga, mediante un análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos en los escenarios de simulación.

### **3. Definición de los criterios de penetración de la información suministrada al viajero**

Este capítulo presenta la metodología propuesta para determinar las preferencias que tienen los usuarios de automóvil particular al conducir, frente al uso de tecnologías de información que le permitan conocer el estado de tráfico de la ciudad y le sugieren caminos disponibles para efectuar sus desplazamientos. Para tal fin se realizó en primera instancia una búsqueda bibliográfica que permitió identificar las tecnologías de computación y comunicación que brindan información de tráfico al viajero, y las variables más representativas que pueden afectar la decisión de elección de ruta de los conductores.

Así mismo se estructuró un instrumento de medición tipo encuesta que permitió conocer las preferencias de una muestra de conductores respecto a la consulta de información de tráfico y su disposición a aceptar o rechazar la información suministrada, mediante un estudio de caso en el contexto local del área metropolitana de Bucaramanga. Posteriormente se depuró, procesó y analizó la información recolectada y a partir de esta se identificaron los principales supuestos del comportamiento del conductor ante el suministro de información de tráfico y se determinaron las principales variables a considerar para la definición de las tasas de aceptación o rechazo de la información por parte del conductor. A continuación, se presenta en detalle, cada una de las actividades desarrolladas.

#### **3.1. Identificación de tecnologías y supuestos del comportamiento del conductor ante el suministro de información de rutas de viaje**

Las decisiones de viaje que toma un conductor para efectuar sus desplazamientos pueden verse influenciadas por diferentes circunstancias y puede estar sujeto a cambios de acuerdo con

las condiciones de la red, a sus preferencias, o a cambios debido al crecimiento urbano como mejoras en la infraestructura de transporte, demografía o uso de suelo. Los ajustes necesarios para realizar sus desplazamientos pueden darse de forma inmediata en caso de un imprevisto como la existencia de un incidente, o en el transcurso de semanas o días de acuerdo con las condiciones de tráfico de la red. (Sundaram et al., 2011)

Con el objetivo de conocer las variables que influyen en la elección de ruta de un conductor para efectuar sus desplazamientos, a continuación, se presenta la metodología utilizada para identificar las variables que influyen en la elección de ruta, así como las tecnologías disponibles para el suministro de información de tráfico a los conductores, presentando los hallazgos más relevantes.

### ***3.1.1. Identificación de las variables que influyen en la decisión de ruta de un conductor.***

Dado que los ATIS están diseñadas para proporcionar información previa al viaje, así como en ruta, y los tiempos de viaje en las alternativas relevantes, se puede esperar que las opciones de los viajeros probablemente sean sensibles a variables como la precisión de la información proporcionada, la incertidumbre del tiempo de viaje, entre otras. (Ben-Elia, Di Pace, Bifulco, & Shiftan, 2013) La elección que realiza un conductor de su ruta, se supone racional y de acuerdo con una evaluación de las alternativas disponibles, identificando los atributos ofrecidos y calculando la utilidad derivada de cada una, con el objetivo de buscar el mayor beneficio atribuido a su elección. (Chorus, Molin, & Van Wee, 2007)

Con el fin de determinar las variables que influyen en la elección de ruta de un conductor, se identificaron variables usadas en otros estudios, que demostraron tener una incidencia directa en la elección de ruta de los conductores, las cuales en su mayoría se relacionan con el

comportamiento de un conductor que decide la ruta o rutas bajo las cuales efectuará sus desplazamientos, ya sea que considere o no, los efectos del suministro de información de tráfico.

Hall (1996), indica que las variables de decisión de los conductores pueden dividirse en 3 variantes principales: la experiencia de viaje, la experiencia informativa y la información y observaciones. A su vez cada una de ellas contempla diferentes factores que son considerados al seleccionar una ruta, los cuales se presentan en la *Figura 1*.

### Figura 1

#### *Variables de decisión de los conductores*



*Nota: Elaboración propia basado en (Hall, 1996).*

Si bien esta definición ha sido ampliamente estudiada y utilizada por numerosos autores, también se ha complementado con base en otros enfoques, como el dado por Ben-Elia & Avineri (2015), quienes, de acuerdo con el comportamiento de los viajes y sus implicaciones en la red, caracterizaron la información sobre viajes en una tipología simple compuesta por tres categorías, información experiencial, descriptiva y prescriptiva. La información experiencial se relaciona con

la variable de experiencia de viaje, ya que se retiene en la memoria y se obtiene del aprendizaje reforzado debido a experiencias pasadas. La información descriptiva se asocia con la variable de la experiencia informativa, ya que incluye información que describe las condiciones de viaje predominante ya sean actuales o previstas. Y la información prescriptiva se asocia con la variable de información y observaciones, ya que incluye las sugerencias o alternativas recomendadas. (Ben-Elia & Avineri, 2015)

En la práctica, se supone que las decisiones tomadas por los viajeros se basan inicialmente en la experiencia dada de elecciones anteriores, sin embargo, en la teoría del transporte, la elección se basa en la utilidad esperada de atributos asociados a las alternativas de viajes, entre las que se encuentran el costo, el tiempo de viaje, comodidad, cuidado del medio ambiente entre otros. (Ben-Elia & Avineri, 2015) Adicionalmente, la decisión del conductor puede verse afectada por el comportamiento de cambio de ruta, el cual está influenciado por la naturaleza, puntualidad, calidad y el alcance de la información en tiempo real. Otras variables como el nivel de servicio en rutas alternativas y la experiencia anterior de otros usuarios, pueden afectar de igual forma la decisión a tomar. (Srinivasan & Mahmassani, 2003)

Los primeros esfuerzos para identificar las variables que influyen en la decisión de aceptar o rechazar la información suministrada al viajero, dieron como resultado la definición de características de los usuarios asociadas a variables socioeconómicas, características asociadas al viaje y características asociadas a la información, estas últimas se relacionan con la adquisición de información de tráfico preliminar y la elección inicial de ruta. (Ben-Akiva, Koutsopoulos, & Mukundan, 1994) Bonsall (1992) identificó factores que influyen en la elección de ruta de un usuario, relacionados con el tiempo total del viaje esperado, retrasos por congestión, señalización de las rutas, existencia de peajes, seguridad, desconocimiento de la rutas y calidad visual del

recorrido. Wardman, Bonsall, & Shires (1997), reportaron que la información sobre accidentes, retrasos y congestión puede tener una influencia importante en la elección de la ruta por parte del usuario de las ATIS.

Investigaciones más recientes identificaron factores determinantes en el comportamiento de los individuos frente a las ATIS, según la revisión de literatura realizada por Chorus et al. (2007), la combinación de factores como la edad, género, la educación y los ingresos, aumenta la posibilidad de consulta de la información de tráfico, así mismo los individuos que tienen acceso a un dispositivo móvil con conexión a internet, o personas que continuamente manejan tecnologías, son más propensos a realizar consultas para efectuar sus desplazamientos.

Otros factores identificados en la literatura se relacionan con la falta de conocimiento de las características de las alternativas asociadas al viaje, por ejemplo, se encontró que la falta de conocimiento de una ruta, la congestión, la hora del desplazamiento, incertidumbre en los tiempos de viaje y longitud del viaje, impulsan al conductor a realizar consultas.(Wardman et al., (1997); Ackaah, (2019))Otros estudios identificaron que es más probable que los usuarios consulten información relacionada con la ruta que el usuario conoce o usa con frecuencia, en lugar de consultar rutas alternativas. Por otro lado, la disponibilidad de varias alternativas de viaje, en vez de una única alternativa planificada, hace que los conductores tengan más disposición a adquirir la información brindada por las ATIS. (Chorus et al., 2007)

Prato, Bekhor, & Pronello (2012) identificaron determinantes del comportamiento de los conductores relacionadas con los tiempos y costos de viaje, la confiabilidad de la información, las características de la ruta propuesta y la frecuencia del viaje. Zhang & Levinson (2008) identificaron otra variable relacionada con el costo de la información suministrada, encontrando que existe una baja disposición a pagar por la información ya que los usuarios sienten que ya han

pagado por la información relacionándolo con el costo del uso de las aplicaciones que brindan la información.

Bagloee et al. (2012) encontró con base en una revisión bibliográfica extensa, que muchos autores concuerdan en que los factores críticos que influyen en la decisión de los conductores son la edad, el género, el tamaño del hogar, los ingresos, la experiencia de conducción, el conocimiento de rutas alternas, el propósito del viaje, la longitud del viaje, el tiempo, la satisfacción, la frecuencia de consulta de la información y el tipo de fuente de información. Se concluyó que las variables que pueden afectar el desvío de ruta se clasifican en 4 categorías, la primera relacionada con las características demográficas y socioeconómicas, la segunda con características relacionadas con el conductor asociadas a la familiaridad de las rutas, la tercera relacionada con las condiciones del viaje como la hora de salida o duración del viaje, y la última relacionada con el propósito del viaje.

Finalmente, la identificación de las diferentes variables que influyen en la elección de ruta de los viajeros ha derivado en la necesidad de efectuar modelaciones para representar el comportamiento del conductor y su influencia en la red. Diferentes autores han propuesto una gran variedad de métodos para determinar el valor de la información, entre los cuales se considera los tiempos observados y calculados, la utilidad esperada, o la reducción percibida en el costo del tiempo y la incertidumbre. (Zhang & Levinson, 2008) Se han propuesto diferentes soluciones y herramientas para resolver la modelación del comportamiento, entre las que se encuentran algoritmos de ruta más corta, de minimización de costos generalizadas, modelos heurísticos, simulación simple y de enfoque estocástico, representaciones determinísticas, estocásticas en función de la utilidad, entre muchos otros que se presentan en detalle en la revisión de literatura realizada por Zhang & Levinson (2008). En el *Capítulo 4*, se presenta el modelo desarrollado en

la presente investigación y en el mismo se encuentra la metodología seleccionada para su asignación.

### ***3.1.2. Tecnologías de la información usadas para el suministro de información de tráfico***

Los Sistemas Avanzados de Información al viajero (ATIS) son tecnologías pertenecientes a los Sistemas Inteligentes de transporte (ITS), las cuales se basan en computación, comunicación e información, y brindan información al usuario sobre tiempos de viaje de una red, rutas disponibles, servicios de ubicación, incidentes como choques de tránsito, eventos de construcción de carreteras, inclemencia de tiempo, situaciones peligrosas, mensajes de advertencia, y demás situaciones que puedan interrumpir el comportamiento normal de una red. (Kumar, Singh, & Reddy, 2003; Ackaah, 2019)

Las ATIS están diseñadas para transmitir información a los usuarios para ayudar a la planeación de sus de viajes y ofreciendo indicaciones a lo largo del camino, de acuerdo con las preferencias de viaje de los conductores, adquiriendo, analizando, comunicando y entregando información que facilita los desplazamientos entre orígenes y destinos. Algunos de los mecanismos más usados para la transmisión de la información son la radio, la televisión, los sistemas de navegación dinámicos instalados en vehículos, servicios de internet, servicios de teléfonos inteligentes, y paneles de mensajería variable. (Ackaah, 2019; Khattak, Pan, Williams, Roupail, & Fan, 2008)

Es posible separar las tecnologías ATIS en dos grupos de acuerdo con el momento en que son implementadas. El primero es el grupo que puede ser consultado previo al viaje, entre las cuales se encuentran los servicios de internet, transmisión de radio y televisión, estas tecnologías brindan información en tiempo real sobre el estado de tráfico y pueden orientar a los viajeros en

sus elecciones previo al inicio de su viaje, influyendo sobre su hora de salida, modo de transporte, ruta y destino. El segundo grupo son las tecnologías usadas en ruta, la cuales informar al conductor sobre límites de velocidad, sistemas de mensajería variable, e información en tiempo real que pueda ayudar a los conductores a tomar decisiones respecto a posibles incidentes que puedan encontrarse a lo largo de sus trayectorias. (Ackaah, 2019)

A continuación se presenta una breve descripción de las tecnologías realizada por autores como Ackaah (2019), Khattak et al. (2008) y Bagloee et al. (2012), quienes realizaron una revisión de literatura recopilando información sobre las diferentes tecnologías de la información usadas para el suministro de información a conductores.

- Tecnologías como los paneles de mensajería variable son implementados sobre la red vial como estrategias de gestión de tráfico, entre las cuales se pueden implementar controles de velocidad dinámicos, señalización variable de acuerdo con las necesidades y condiciones del tráfico, pueden informar sobre situaciones potencialmente peligrosas, desvíos, obras de construcción, demoras o restricciones por tipo de vehículos, entre otra información necesaria para el conductor.
- Los sistemas de navegación a bordo pueden proveer información estática por medio de un mapa precargado que brinda apoyo en sus desplazamientos a un conductor no familiarizado con su entorno, como los límites de velocidad, distancia y tipo de carretera. En el caso de la información en línea, estos sistemas consideran la situación del tráfico y los tiempos de viaje para estructurar una ruta.
- La radio y televisión han sido los medios de transmisión de información más tradicionales durante mucho tiempo, obtienen información de diferentes fuentes y posteriormente la transmiten a sus oyentes o espectadores. La principal limitación

de estos medios de información es que no se encuentra disponible en todo momento y la información no está actualizada en tiempo real.

- Los servicios de internet y de telefonía móvil, proveen información al usuario en tiempo real mediante plataformas o aplicaciones que indican mapas de congestión, codificando los segmentos con colores e indicando los posibles retrasos y estimando tiempos de viaje, además informan sobre la existencia de incidentes, cierres u obras viales existentes. Adicionalmente existen servicios de información telefónica a los cuales es posible llamar a un centro de información al viajero para conocer las condiciones de tráfico de la ciudad.

Además de las tecnologías usadas para la provisión de información, se han implementado tecnologías orientadas a la recolección de información sobre el estado de tráfico de la ciudad, las cuales comprenden la localización automática de vehículos (AVL por sus siglas en ingles), la navegación por radio terrestre, la ubicación geográfica celular y el GPS, los cuales proporcionan información sobre tiempos de viaje y opciones de ruta para efectuar sus desplazamientos integrando la información sobre los flujos de tráfico en las secciones involucradas. (Cipriani, Nigro, Fusco, & Colombaroni, 2014) Estas tecnologías determinan la posición de los vehículos y las transmiten a un sistema de seguimiento de vehículos, a receptores incorporados en el sistema global de navegación satelital o mediante la triangulación a celda de cobertura de proveedores de red, de esta forma es posible que los dispositivos generen y reciban información de tráfico. (Ackaah, 2019)

Existen otras tecnologías que son usadas para para la recopilación de información de datos de transporte directamente en la infraestructura vial, incorporan los sensores integrados en el

pavimento, radares, cámaras en carreteras usadas para la medición de flujos y velocidades tanto en los nodos como en los enlaces. Cipriani et al. (2014)

Como se mencionó, las tecnologías descritas usan diferentes mecanismos para la difusión de la información, sin embargo, se encontró que los más representativos son los relacionados con información web, seguidos de los servicios de asesoramiento telefónico y la radio. Así mismo se encontró que las autoridades de transporte han implementado amplios sistemas de transporte y control del tráfico urbano, lo cual genera información personalizada para los viajeros. (Khattak et al., 2008; Chorus et al., 2007)

### **3.2. Medición de la tasa de aceptación de información de tráfico**

Para conocer cómo pueden redistribuirse los flujos vehiculares en la red de transporte de una ciudad por causa del suministro de información de tráfico a los conductores es necesario comprender las decisiones que toma un conductor con relación a la ruta que elegirá para ir de un punto de origen a un destino, las cuales pueden verse afectadas por diferentes variables como la congestión, los tiempos de viaje, eventos externos, accidentes, entre otras.

Para tal fin, es necesario estudiar la población de conductores para establecer su comportamiento y hábitos. Sin embargo, estudiar toda la población requiere de un esfuerzo logístico y económico extremadamente alto, por tal razón en esta investigación se realizó un muestreo aleatorio y se aplicó un instrumento de medición tipo encuesta, diseñado para identificar a nivel local, las variables que influyen en la selección de ruta de un conductor, y obtener una estimación preliminar del grado de aceptación o rechazo de la información de tráfico suministrada a los conductores del área metropolitana de Bucaramanga.

La construcción de la encuesta se hizo con base en información secundaria recolectada a partir de la bibliografía, desde la cual se identificaron diferentes tecnologías de computación y

comunicación, y se caracterizaron y analizaron estudios orientados a entender el comportamiento de los conductores ante la posibilidad de modificar la ruta seleccionada para efectuar sus viajes.

Se buscó relacionar directamente el comportamiento de los conductores ante la aceptación de información de tráfico con el objetivo por el cual modifican su ruta de acuerdo con la información brindada, definir este comportamiento por medio de modelos matemáticos o conceptuales no fue posible ni adecuado ya que no existe información suficiente para tal fin, así que fue necesario obtener información primaria ajustada al caso de estudio. Así mismo se realizó una revisión de la literatura, en la cual se encontró que en países en desarrollo el uso de tecnologías ATIS está en una etapa básica de implementación (Ackaah, 2019), de la misma forma en el contexto latinoamericano no fue posible identificar aplicaciones que permitan predecir o determinar el nivel de aceptación de la información relacionadas con rutas para efectuar desplazamientos y su efecto en el comportamiento de decisión de los usuarios.

### ***3.2.1. Definición de variables que influyen en la decisión de la elección de ruta***

Como se mencionó en la sección de revisión bibliográfica, el comportamiento de los conductores ante la elección de una ruta ha sido ampliamente investigado en presencia y en ausencia de información de tráfico. Se encontraron diferentes estudios que identificaron variables como la familiaridad del conductor, la experiencia previa, la disponibilidad y percepción de rutas alternativas, tiempo de viaje, existencia de retrasos o incidentes y disponibilidad de información.

La selección de las variables se realizó con base en la revisión de la literatura, de tal forma que, al estudiarse en el contexto del área metropolitana de Bucaramanga, dieran una luz sobre las preferencias y el comportamiento de los conductores al elegir una ruta para desplazarse. Ya que la eficiencia en la selección de las variables que determinan las tasas de aceptación de la información determina la fortaleza que tendrá el valor calculado (Schuschny & Soto, 2009), se realizó una

selección considerable de variables, las cuales fueron depurándose de acuerdo con los criterios de relevancia para los objetivos de la investigación, calidad en la medición, frecuencia de uso y disponibilidad al dominio público.

El *Apéndice A*, presenta la relación de las variables seleccionadas preliminarmente, para las cuales se definió el concepto a abordar, las variables a medir y la justificación de la selección para cada una de ellas. Dicha selección preliminar fue depurada y se definieron las variables de interés, las cuales se presentan en la *Tabla 1*.

**Tabla 1**

*Selección final de las variables a medir.*

| Ítem | Variable                              | Codificación de la Variable | Clase de Variable | Tipo de Variable |
|------|---------------------------------------|-----------------------------|-------------------|------------------|
| 1    | Conduce/No Conduce                    | V1                          | Nominal           | Cualitativa      |
| 2    | Número de viajes por semana           | V2                          | Discreta          | Cuantitativa     |
| 3    | Tiempo promedio de recogido           | V3                          | Continua          | Cuantitativa     |
| 4    | Conocimiento de la aplicación         | V4                          | Ordinal           | Cualitativa      |
| 4.1  | Interés en consulta de la información | V5                          | Ordinal           | Cualitativa      |
| 4.2  | Uso de la información                 | V6                          | Ordinal           | Cualitativa      |
| 5    | Dispositivos de consulta              | V7                          | Nominal           | Cualitativa      |
| 6    | Razones de consulta                   | V8                          | Nominal           | Cualitativa      |
| 7    | Frecuencia de consulta                | V9                          | Ordinal           | Cualitativa      |
| 8    | Momento de uso de la información      | V10                         | Ordinal           | Cualitativa      |
| 9    | Intensión de modificar la ruta        | V11                         | Ordinal           | Cualitativa      |
| 9.1  | Motivo de modificación de ruta        | V12                         | Nominal           | Cualitativa      |
| 10   | Momento de consulta de la información | V13                         | Ordinal           | Cualitativa      |
| 11   | Utilidad de la información            | V14                         | Ordinal           | Cualitativa      |

|             |  |     |          |              |
|-------------|--|-----|----------|--------------|
| <b>12</b>   | Frecuencia de aceptación de la información | V15 | Ordinal  | Cualitativa  |
| <b>13</b>   | Confiabilidad de la información            | V16 | Ordinal  | Cualitativa  |
| <b>14</b>   | Pago o No pago por información             | V17 | Ordinal  | Cualitativa  |
| <b>15</b>   | Motivo de no consulta                      | V18 | Nominal  | Cualitativa  |
| <b>16</b>   | Disposición al cambio de ruta              | V19 | Ordinal  | Cualitativa  |
| <b>16.1</b> | Razones de modificación de ruta            | V20 | Nominal  | Cualitativa  |
| <b>17</b>   | Sexo                                       | V21 | Nominal  | Cualitativa  |
| <b>18</b>   | Edad                                       | V22 | Discreta | Cuantitativa |
| <b>19</b>   | Ocupación                                  | V23 | Nominal  | Cualitativa  |
| <b>20</b>   | Formación                                  | V24 | Nominal  | Cualitativa  |
| <b>21</b>   | Nivel socioeconómico                       | V25 | Discreta | Cuantitativa |
| <b>22</b>   | Ubicación                                  | V26 | Nominal  | Cualitativa  |

*Nota: Elaboración propia.*

### **3.2.2. Construcción e implementación del instrumento de medición**

Una vez se identificaron las variables de interés, se procedió a documentar el proceso de construcción y aplicación del instrumento de medición. Como punto de partida, a cada una de las variables de interés se le asignaron atributos que especifican información asociada como, la pregunta con la que se abordará al usuario para obtener la información de interés, la población objetivo, codificación, tipo y clase de variable, categoría de medición, rango de respuestas esperadas, método de análisis para el procesamiento de la variable. La información mencionada se presenta en el *Apéndice B*.

Es de gran importancia señalar, que para la presente investigación no se cuenta con información secundaria oficial que permita al investigador estimar la tasa de aceptación de información de tráfico o ruta, debido a que para el caso de estudio a la fecha no se han implementado proyectos orientados a obtener beneficios de las ATIS en el área metropolitana de

Bucaramanga. Para brindar información a los usuarios, se cuenta exclusivamente con plataformas de radio, televisión, información web o aplicaciones móviles, orientadas a suministrar información de tráfico, sin embargo, tal conducta no es usada para orientar decisiones o políticas a favor de la movilidad de las ciudades.

Por lo anterior, y ante la dificultad de acceder a información precisa y veraz sobre el uso de las aplicaciones ATIS en el contexto del comportamiento del tráfico del área metropolitana de Bucaramanga, se construyó un instrumento de medición tipo encuesta, con el objetivo de conocer los hábitos de conducción de los usuarios en las ciudades, teniendo en cuenta el uso y los efectos de la información de tráfico y/o ruta, o considerando que dicha información no fuera usada por el usuario. A continuación, se presentan las consideraciones más relevantes en la construcción y aplicación de la encuesta.

#### **3.2.2.1. Consideraciones principales del proceso de muestreo.**

Como primer paso para la construcción y aplicación de la encuesta, se definió de forma adecuada las etapas del muestreo a realizar, esto permitió diseñar el instrumento de medición acorde a las necesidades del proyecto, con el fin de obtener un muestreo de calidad que pudiera brindar información acerca del comportamiento de los conductores ante el suministro de información de tráfico. A continuación, se presenta la definición de los principales criterios requeridos para el procedimiento de muestreo.

- **Población objetivo:** conductores del área metropolitana de Bucaramanga, mayores de edad, con licencia de conducción vigente, y que hayan conducido un vehículo particular tipo automóvil, campero o camioneta, durante el mes anterior a la aplicación de la encuesta.

- **Unidades de muestreo:** 1. Conductores de un vehículo particular que usen ATIS para efectuar sus desplazamientos. 2. Conductores de vehículo particular que no usen o no conozcan las ATIS como herramientas para efectuar sus desplazamientos.
- **Alcance:** Área metropolitana de Bucaramanga
- **Tiempo definido para la toma de información:** 45 días.
- **Tipo de muestreo:** Muestreo de una etapa
- **Método de recolección de la información:** Operativo de campo implementado por medio de una entrevista estructurada y personal con cada uno de los participantes, en la cual el investigador registró las respuestas de los participantes mediante una plataforma web que contenía el formulario definido.
- **Marco muestral:** la presente investigación se limitó a los conductores que efectúan sus desplazamientos teniendo como origen y destino el área Metropolitana de Bucaramanga. El marco muestral comúnmente se detalla mediante una relación o listado de conductores que permite dimensionar y distribuir espacial y temporalmente los individuos pertenecientes a nuestra población de interés, realizar este proceso no fue posible ya que no se contó con una base de datos con información detallada que permitiera aislar una muestra de individuos en el área de estudio con las características de interés para la investigación. Es así como la muestra se determinó con base en el procedimiento de control de inclusión o exclusión de participantes que se relaciona a continuación, el cual se construyó con el objetivo de obtener una muestra representativa con las características deseadas para la población en estudio.

- **Control de inclusión o exclusión de participantes:** En primera medida se abordaron al azar individuos conductores de vehículos que contaran con licencia de conducción vigente, es decir que quienes no cumplieran con el perfil definido fueron excluidos. Posteriormente se identificó a los conductores de vehículos livianos tipo automóvil, camioneta y/o campero, quienes manifestaron conducir vehículos diferentes a los mencionados fueron excluidos. Finalmente, solo se aplicó la encuesta a los conductores de vehículos livianos con licencia de conducción vigente y que además manifestaron haber conducido en el mes posterior a la aplicación de la encuesta.
- **Tipo de Muestreo:** No probabilístico. Ante la imposibilidad de cumplir con los requisitos propios de un muestreo probabilístico, la presente investigación se desarrolló mediante un muestreo no probabilístico, ya que no fue posible definir con exactitud un marco muestral, lo cual a su vez imposibilitó estimar la probabilidad de inclusión exacta para cada uno de los participantes. Sumado a lo anterior, es importante resaltar que establecer un muestreo estadísticamente significativo requeriría de una inversión importante en recursos de personal, tiempo y costos, además de la información secundaria detallada sobre la población a estudiar.
- **Aplicación de la encuesta:** Se realizó por medio de una entrevista se aplicó de forma presencial, de acuerdo con la disposición de los conductores para contestar el formulario. El encuestador se ubicó en lugares de alta afluencia de la población en estudio, como parqueaderos en centros y zonas comerciales, Centros de

Diagnóstico Automotor CDA y Direcciones de Tránsito Municipales, ubicados en los Municipios de Bucaramanga, Girón, Piedecuesta y Floridablanca.

Los individuos identificados como posibles encuestados, fueron abordados por el encuestador explicando los objetivos y alcances del estudio, y dejando en claro la política de tratamiento de datos aplicable para la encuesta, para finalmente consultarles si tenían interés en participar en la investigación. Esta actividad se desarrolló de la mano de un folleto informativo que presenta la información más relevante del proyecto y el cual relacionaba la página web creada para presentar la información correspondiente a el operativo de muestreo y el desarrollo de la investigación, con el fin de que los participantes pudieran verificar la validez de la encuesta, así como su roll en el desarrollo de esta.

### **3.2.2.2. Consideraciones sobre el tamaño de la muestra**

Como se mencionó anteriormente el tipo de muestreo seleccionado fue no probabilístico realizando un muestreo por conveniencia, es así que se efectuó un estudio de mercado, principalmente debido a la escasez de información disponible y al limitado avance en la investigación e implementación de las ATIS como herramienta de planificación en el contexto colombiano. A continuación, se presenta las principales consideraciones que se tuvieron en cuenta para definir el tamaño de la muestra para el desarrollo del estudio.

- **Técnica de muestreo:** Por conveniencia. Esta técnica de muestreo selecciona los elementos de la población que harán parte del análisis por conveniencia para el investigador y de acuerdo con la facilidad de acceso y disponibilidad de los individuos, realizando la selección de acuerdo con las características o rasgos particulares que permiten identificar la población de interés, también es usado

comúnmente para conocer sobre hábitos y opiniones de la población, ya que suele ser económico, rápido y sencillo. Aunque este tipo de muestreo no permite asegurar la representatividad de la muestra (Kinnear & Taylor, 2007), los elementos a muestrear fueron seleccionados siguiendo los criterios mencionados en el procedimiento de control y exclusión de participantes, procurando abordar apropiadamente la población objetivo.

- **Tamaño muestral:** No es posible definir un número exacto de tamaño muestral en un muestreo no probabilístico por conveniencia, ya que, al no contar con un marco muestral definido, es inviable obtener una cantidad exacta de unidades a encuestar. Es así como el tamaño muestral se definió acotando el levantamiento en un periodo de tiempo, el cual se precisó basado en los recursos económicos y de personal con los que se contó para la investigación, de forma que el tamaño de muestra fue definido según la cantidad de participantes que fue posible encuestar durante un periodo de 45 días.

Si embargo, con el fin de definir un umbral de encuestas a realizar, se realizó un ejercicio de cálculo teniendo en cuenta los valores históricos asociados al parque automotor de los municipios del área metropolitana de Bucaramanga, con el fin de plantear un objetivo a alcanzar en la implementación del muestreo, sin que esto obligara a alcanzar el número de encuestas estimadas, ya que se contó con un presupuesto limitado.

Considerando lo anterior, se definió el valor de población como el promedio del parque automotor de vehículos livianos matriculados en área metropolitana de Bucaramanga en los años de 2015 a 2019 el cual corresponde a 149.823 vehículos.

A partir de este valor, se definió un intervalo de confianza del 95% con un margen de error máximo aceptado de 5% y una probabilidad de ocurrencia del 50%. Con esta información se determinó como valor de referencia para muestrear la población de interés, 383 encuestas.

La estimación realizada contempló exclusivamente el parque automotor del área metropolitana de Bucaramanga, sin embargo, se ha identificado que en los últimos años algunos vehículos que circulan frecuentemente en la red en estudio han matriculado sus vehículos en municipios diferentes a los pertenecientes al área de estudio. Para considerar esta eventualidad, se realizó una estimación sobre el número de vehículos adicionales que deberían incluirse al parque automotor, y suponiendo una adición de 10.000 vehículos, el valor estimado de la muestra no se afecta en mayor medida, ya que la estimación realizada para la muestra no presentaría variaciones significativas cuando se estudian muestras de tamaños considerables.

- **Significancia estadística /error muestral:** En este caso no es posible determinar la significancia estadística del muestreo realizado ya que como se mencionó anteriormente el muestreo realizado fue no probabilístico. Igualmente es importante señalar que se desconoce el error muestral, debido a que no fue posible identificar el total de la población de la cual se tomó la muestra, y la población que tuvo la posibilidad de ser encuestada corresponde únicamente a quienes se encontraban en los sitios señalados, así como las encuestas realizadas corresponden a las aplicadas entre el periodo dispuesto para el levantamiento de información y no como tal a valor estimado de referencia. (Kinnear & Taylor, 2007).

- **Implicaciones estadísticas debido al muestreo no probabilístico realizado:** Ya que no fue posible realizar una distribución probabilística para la aplicación de la encuesta o estimar de forma rigurosa un valor representativo a muestrear, los resultados obtenidos no se entenderán como una representación de la población total. Sin embargo, la información recolectada permite obtener una perspectiva importante sobre el comportamiento de los conductores ante el suministro de información de tráfico para la muestra estudiada. Además, dado que los resultados de la encuesta sobre uso de la información serán usados como input en el modelo de simulación en términos de proporción, estos pueden ser considerados adecuados a pesar de venir de un proceso de muestreo no probabilístico.
- **Pasos finales para la ejecución del muestreo:** Los últimos pasos para el desarrollo de muestreo consistieron en el diseño de la encuesta, la implementación de un piloto, la aplicación definitiva de la encuesta y el trabajo de campo requerido para el levantamiento de información, los capítulos siguientes muestran en detalle el procedimiento que se siguió para cada uno de ellos

#### **Aspectos importantes relacionados con las consideraciones presentadas:**

Se esperaba contar con un registro de licencias de conducción de vehículos livianos (automóvil, motocarro, camperos, camioneta) de Servicio Particular (categoría B1) y con información relacionada con la cantidad matrículas vigentes registradas en los municipios de Floridablanca, Girón, Piedecuesta y Bucaramanga. Sin embargo, aun cuando se realizó la solicitud, no se obtuvo ninguna respuesta de las secretarías Municipales a excepción de las alcaldías de los Municipio de Floridablanca y Piedecuesta, las cuales relacionaron únicamente un resumen general del registro del parque automotor del Municipio.

De la misma forma se consultó al Registro Único Nacional de Transito (RUNT) la posibilidad de obtener dicha información, y se nos informó que al ser una empresa privada que ejecuta una concesión para el manejo de tal información, la información tiene asociado un costo importante, el cual no fue posible cubrir. Por otra parte, para lograr la distribución probabilística de la muestra, se requería el registro de direcciones y contactos de los conductores, información que se encuentra protegida dentro de la Ley 1581 de 2012 la cual constituye el marco general de la protección de los datos personales en Colombia.

Suponiendo un escenario optimista en el que se contara con la información antes mencionada, se identificaron limitaciones adicionales en el desarrollo de la encuesta, específicamente en lo relacionado con el cálculo de un marco muestral y la determinación de una muestra probabilística. Se encontró que la información suministrada por dependencias como las direcciones de tránsito municipales y el Registro Único Nacional De Tránsito (RUNT) podría contar con un sesgo significativo ya que es muy probable que cierto porcentaje de los vehículos que transitan en la malla vial de área metropolitana no estén registrados en las direcciones de tránsito de los municipios, de la misma forma que no todas las licencias de conducción se expidieron localmente o se asegura un uso frecuente de los automóviles registrados.

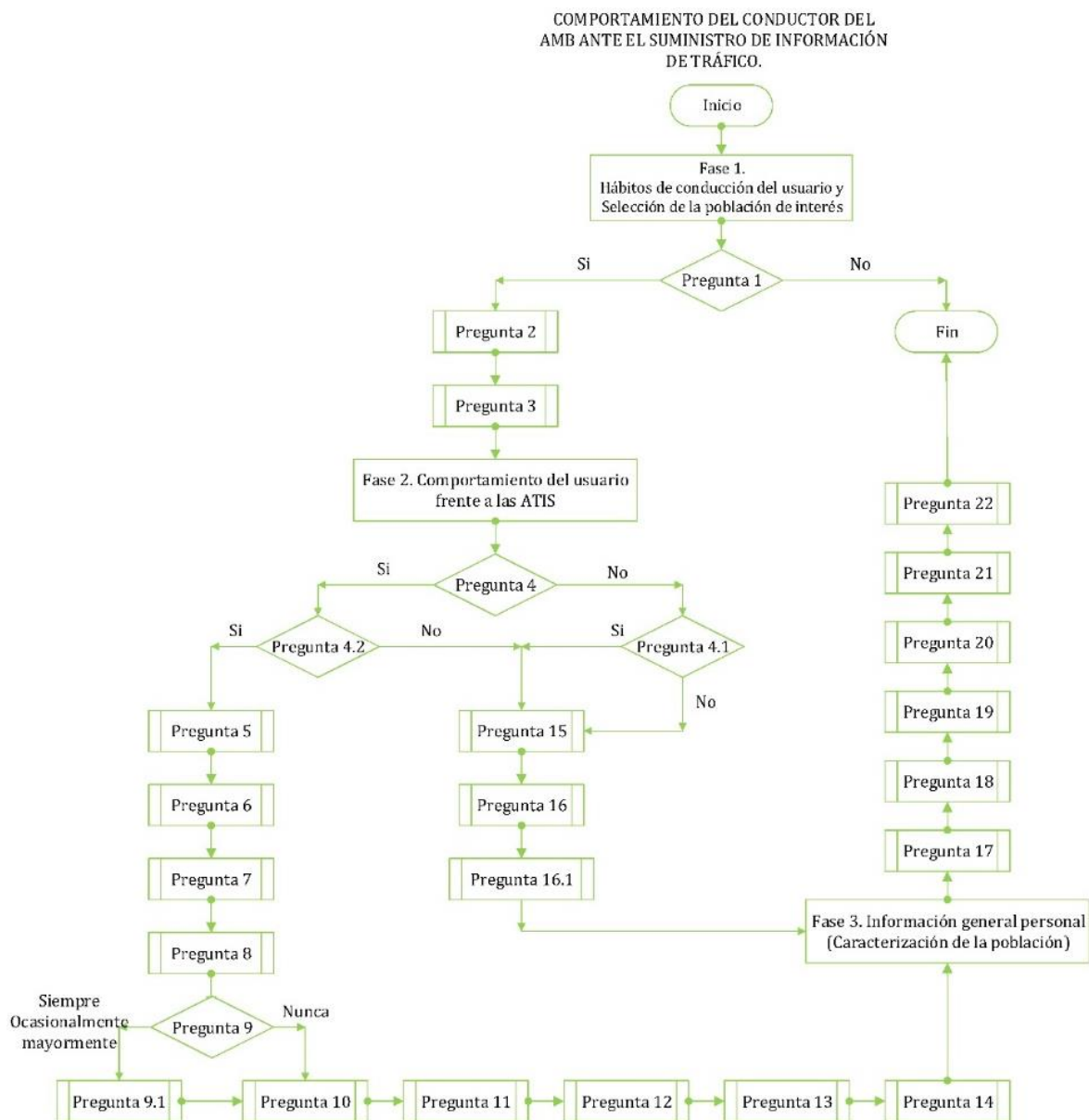
### **3.2.2.3. Diseño del instrumento de medición.**

El instrumento de medición seleccionado fue una encuesta de preferencias reveladas. En primer lugar, se definió que su aplicación se realizaría en forma de entrevista personal, mediante preguntas cerradas o mixtas en el caso de que fuera necesario incluir un campo para que el encuestado añadiera una opción que no se hubiese contemplado. El formulario se dividió en 3 secciones, para las cuales finalmente se contó con un total de veintiséis (26) preguntas y un tiempo

promedio por encuesta de entre 3 y 5 minutos. La *Figura 2* muestra la estructura de encuesta implementada.

**Figura 2**

*Diagrama de la estructura propuesta para la encuesta.*



*Nota. Elaboración propia.*

La primera sección “Hábitos de conducción del usuario”, está compuesta por tres preguntas que buscan asegurar que la persona que está siendo consultada hace parte de la población de interés, a la vez que permite al investigador identificar la frecuencia y duración de los viajes realizados por los encuestados, como parte importante para entender el comportamiento de la población en estudio.

La segunda sección “Comportamiento del usuario frente a las ATIS”, está compuesto por diecisiete preguntas, y busca principalmente diagnosticar la forma en que son usadas las ATIS por los usuarios en el área metropolitana de Bucaramanga. Contempla dos enfoques, uno orientado hacia los conductores que hacen uso de estas tecnologías e indaga sobre la forma de uso, frecuencia, aceptación, calidad, y pertinencia de la información suministrada por las aplicaciones. El otro enfoque se dirige a los conductores que no conocen las tecnologías o no hacen usos de ellas, y se enfoca en conocer las razones por las cuales no consultan la información y se establecen opciones para identificar posibilidades para incentivar el uso por parte de esta población.

Finalmente, la tercera sección presenta la “Información general particular de cada encuestado”, compuesto por seis preguntas las cuales buscan caracterizar la población encuestada. Se consulta información relacionada con edad, estrato socioeconómico, sexo, nivel educativo y ubicación del domicilio. Esta información permite caracterizar de forma general el tipo de población muestreada, y a su vez será posible relacionar comportamientos y hábitos de conducción con subgrupos de la muestra considerando, por ejemplo, edades o nivel socioeconómico.

Una vez finalizada la estructuración del contenido de la encuesta, se procedió a conformar el formato de aplicación del instrumento, el cual contempla además de las secciones antes mencionadas, una breve introducción que le permite al encuestado entender su participación en la investigación, y una serie de precisiones y consideraciones éticas que aseguran que el encuestado

participe voluntaria y libremente. El *Apéndice C*. presenta el formulario final establecido para la aplicación de la encuesta.

Como parte del diseño del instrumento de medición fue necesario presentar los documentos y soportes técnicos que justifican la implementación de la encuesta en seres humanos, al Comité de Ética en la Investigación de la Universidad Industrial de Santander, con el fin de dar cumplimiento de forma rigurosa a los principios y consideraciones éticas a las que hubiere lugar derivadas de la implementación del estudio. Se establecieron los principios éticos que enmarcaron la presente investigación, el valor social y clínico de la misma, la forma en que se realizaría el tratamiento de datos, la selección de los participantes, procedimientos específicos para abordar a los participantes, los beneficios generados por el proyecto, así como los riesgos y la normativa nacional e internacional específica vigente relacionado con los aspectos éticos que aplican para la investigación. Esta información se presenta en el *Apéndice D*.

Finalmente, con el fin de asegurar que la encuesta cumpliera el objetivo planteado, se hizo un piloto de aplicación de las encuestas, con el objetivo de identificar posibles falencias relacionadas con la comprensión de las preguntas por parte de los encuestados, y de esta forma obtener observaciones y recomendaciones orientadas a mejorar el instrumento de medición. Se digitalizó la encuesta en la plataforma Google Forms y se envió por medio de correo electrónico a una muestra de conductores cercana, con el fin de obtener retroalimentación de esta.

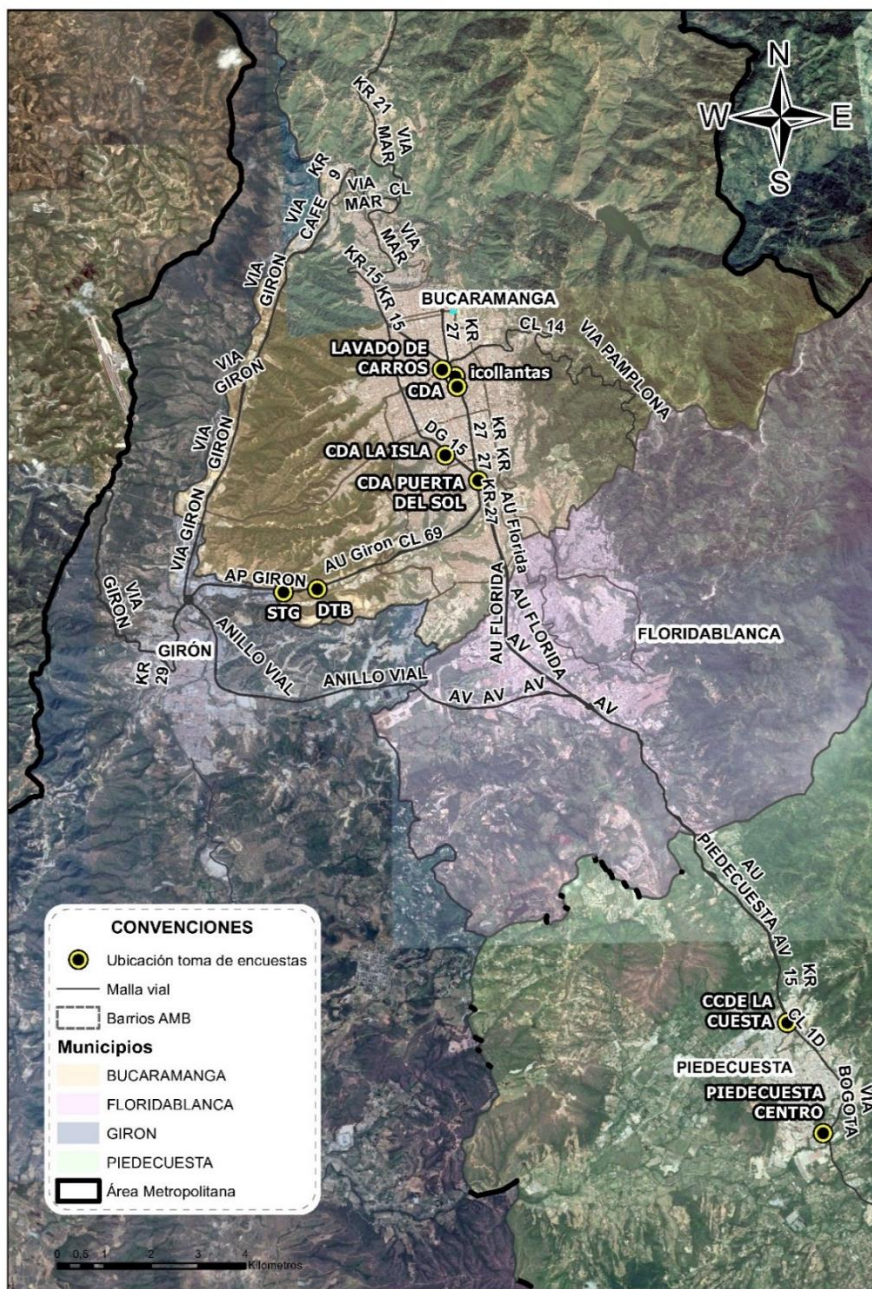
#### **3.2.2.4. Aplicación del instrumento de medición.**

Una vez definida la versión final del cuestionario, se inició el proceso de preparación para la aplicación de la encuesta, para lo cual se usó un dispositivo tipo Tablet a través del cual se accedió al formulario. La encuesta se realizó de forma aleatoria en los puntos señalados en la *Figura 3*, en los cuales se identificó a conductores de vehículo livianos y se les preguntó si querían

participar en un estudio explicándoles brevemente el tiempo requerido y los alcances de la encuesta, asegurando la disposición del encuestado.

### Figura 3

*Ubicación de los puntos en donde se realizaron las entrevistas.*



*Nota.* Elaboración propia.

Una vez se obtuvo el consentimiento verbal para participar del estudio, se procedió a entregar un folleto informativo, en el cual presentaba el objeto de la encuesta aplicada, las consideraciones éticas más importantes, y los datos de contacto del investigador, con el fin de que el encuestado pueda validar la información suministrada. Adicionalmente se dispuso de la página web de consulta *www.manejarconsultar.com*, para que los conductores pudieran consultar la información detallada del estudio y verificar la existencia de la investigación en curso. El folleto distribuido se presenta en el *Apéndice E*.

La forma en que se realizaron las entrevistas permitió un procesamiento de la información inmediato y la creación de una base de datos con el total de la información recolectada, debido a que el formulario arrojaba una base de datos, lo cual permitió disminuir el error por digitalización y transcripción de los formularios. El investigador resolvió el total de las inquietudes presentadas por los encuestados y presentó claramente el objeto y justificación de la investigación en curso. Los conductores que aceptaron participar tuvieron total libertad de responder los interrogantes según su disposición, así como podían terminar el ejercicio en el momento en que así lo desearan.

La información y respuestas que se obtuvieron de los conductores no tienen ningún tipo de relación a nombres propios u otras características que puedan generar algún tipo de identificación posterior, ya que no se considera en ningún momento la recolección de información personal o sensible, que vaya en contra de la política de tratamiento de datos del gobierno Nacional.

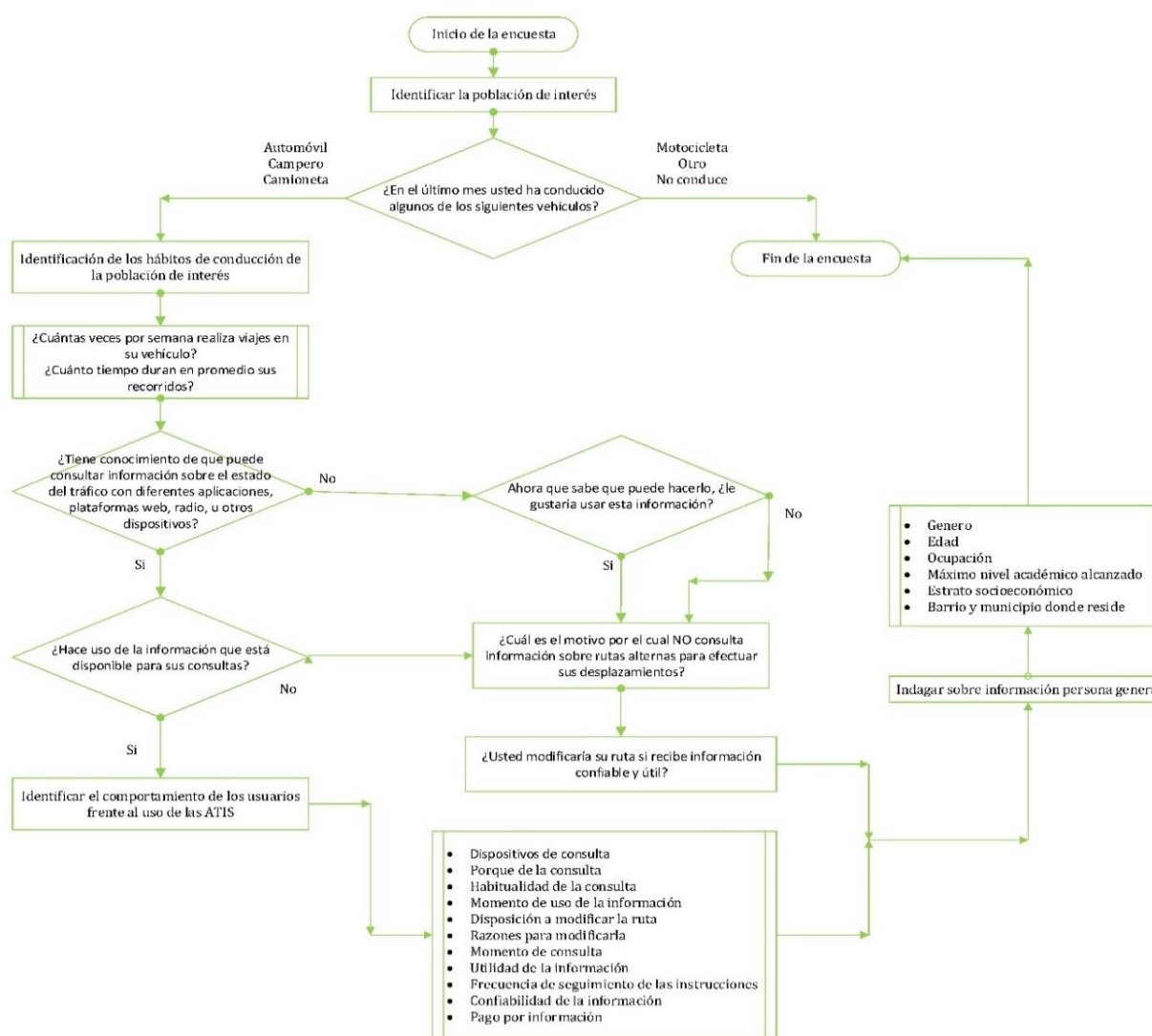
Las condiciones de aplicación de la encuesta fueron iguales para todos los participantes, no obstante, según las necesidades individuales de cada sujeto, se hicieron esfuerzos para lograr la comprensión de las implicaciones del estudio, considerando el esfuerzo propio de su colaboración y la contribución generada a la sociedad gracias a su participación. Se seleccionaron

imparcialmente los participantes realizando una selección aleatoria en los sitios preseleccionados para la aplicación de la encuesta.

En la *Figura 4* puede verse el desarrollo el diagrama de flujo que muestra el procedimiento empleado para la ejecución de la entrevista.

#### Figura 4

*Diagrama del procedimiento para la ejecución de entrevistas.*



*Nota. Elaboración propia.*

Una vez se identificaron los individuos con las características necesarias para el estudio en los lugares seleccionados para la aplicación de la encuesta, se buscó registrar el mayor número de encuestas posibles, afectando mínimamente el normal desarrollo de las actividades de los encuestados, por lo cual la encuesta se aplicó exclusivamente en sitios públicos de concentración de conductores.

### **3.3. Estimación de las tasas de aceptación o desobediencia de la información de tráfico para los conductores del área metropolitana de Bucaramanga**

Una vez finalizado la toma de información de campo, se revisó y codificó la información recolectada, verificando que los campos hubiesen sido llenados de forma correcta. Se procesó y organizó la información y se procedió a limpiar el conjunto de datos realizando diferentes tipos de chequeos que permitieran depurar e identificar errores o datos atípicos en la información recolectada.

Posteriormente se analizó el comportamiento de cada una de las variables y se caracterizó de forma general la población encuestada. Se realizó un análisis de correlación entre las diferentes variables asociadas al comportamiento del conductor, con el fin de identificar la relación existente entre cada una de ellas. Finalmente, se definieron las variables que son relevantes para calcular la tasa de aceptación de información de ruta por parte del conductor y se definieron siete (7) escenarios cada uno con supuestos específicos de aceptación o rechazo.

El presente capítulo expone el tratamiento realizado a la información recolectada y el análisis efectuado a cada una de las variables definidas. Se presenta en detalle las determinaciones tomadas en torno a los análisis realizados, hasta la definición de los escenarios mediante los cuales se obtuvieron las tasas de aceptación de información de tráfico para la muestra de conductores del área metropolitana de Bucaramanga.

### ***3.3.1. Revisión, preparación y verificación de la información recolectada***

De acuerdo con el procedimiento presentado en la sección 3.2.2., se efectuaron las encuestas objeto del estudio durante un periodo de tiempo de 45 días. En este periodo fue posible efectuar 350 entrevistas a conductores del área metropolitana de Bucaramanga, la información base se presenta en el *Apéndice F*. Considerando que el valor estimado de referencia corresponde a 383 encuestas, se determinó que el levantamiento resultado del operativo de campo se aproximó de forma significativa al esperado, por lo cual considerando las limitaciones de presupuesto establecidas y el procedimiento definido, se dio por finalizada la aplicación de la encuesta en el tiempo definido y se procedió a realizar el análisis con la información recolectada.

Se inició el proceso de revisión y verificación preliminar para identificar posibles errores en el diligenciamiento del instrumento de medición, comprobando el diligenciamiento de los campos y estableciendo la proporción de respuestas obtenidas. De la misma forma se revisó que las respuestas obtenidas correspondieran a individuos pertenecientes a la población de interés.

Se verificó que las respuestas dadas por los participantes tuvieran coherencia con la consulta realizada o si por el contrario existía evidencia para creer que el encuestado no comprendió lo que se le estaba preguntando.

Posteriormente, se revisó que las respuestas dadas por los conductores no fueran incoherentes, o se evidenciara falta de interés por parte del participante, afectando la aplicación del instrumento de medición, obteniendo respuestas que no se relacionan con la verdadera opinión del encuestado. Se realizó una comprobación por consistencia, en la cual se verificó la edición del formulario relacionada con la legibilidad y clarificación de la información recolectada (Kinnear & Taylor, 2007).

Adicionalmente, se realizó una búsqueda de campos o formularios no diligenciados (Kinneer & Taylor, 2007), se encontraron algunos registros con este error y se procedió a establecer la relevancia de la falta de la respuesta según la importancia de la pregunta par a el estudio. Los registros que contenían campos que no fueron diligenciados en preguntas con relación directa al índice, fueron excluidos del análisis ya que no era posible contactar nuevamente al encuestado para resolver el error.

Es importante señalar que con el fin de minimizar errores en la medición, la encuesta se aplicó mediante un formulario web y se implementó directamente por el investigador, con el fin de disminuir la posibilidad de presentar desaciertos en la información recolectada que afecte el ejercicio realizado, por esta razón los errores asociados a la información obtenida se limitan a unos cuantos campos con errores de escritura fácilmente reconocibles y con la posibilidad de ajustarlos ya que la respuesta del encuestado estaba clara.

Una vez realizada la revisión preliminar de la información recolectada, se hizo una revisión más detallada que inició con la codificación de la información y tres verificaciones adicionales, códigos extraños, consistencia y caso extremo.

#### ➤ Codificación

La codificación es un proceso mediante el cual se segmentan y reorganizan los datos por medio de códigos o categorías que sustentan el trabajo interpretativo con los datos. (Acevedo, 2011)). La codificación en investigación cualitativa es un proceso dinámico que busca vincular diferentes segmentos de los datos con conceptos y categorías en función de alguna propiedad o elemento común. (Coffey y Atkinson, 2003) citado por (Acevedo, 2011).

La codificación comprende la asignación de un marcador alfanumérico para representar una respuesta específica en un instrumento de medición. (Kinneer & Taylor, 2007) La codificación

de la encuesta se realizó asignando un código a cada una de las preguntas según las variables en estudio. Al obtener las respuestas, se realizó una codificación adicional a las preguntas que contemplaban respuestas múltiples y que se consideran de interés para la conformación de la tasa de aceptación en específico. A las variables complementarias no se les realizó una codificación adicional ya que no se consideró relevante para el análisis y no se requiere estudiar en profundidad. El resultado de la codificación se presenta en el *Apéndice B*.

La codificación para respuestas múltiples se definió según lo expuesto por Peña (2002), quien expone que la codificación establece un valor numérico para las variables que inicialmente se plantearon como un intervalo de medición, las cuales, para el caso de la presente investigación, fueron pensadas para medir la aceptación, seguridad, comodidad y frecuencia de uso de las aplicaciones.

Se estableció una escala para las variables cualitativas que poseen categorías de rangos o intervalos de evaluación, de forma que el encuestado tiene un mayor entendimiento de la pregunta, y el encuestador tiene mayor posibilidad de identificar y clasificar la opinión percibida por el encuestado, por lo cual el tratamiento a dichas variables se realizó numéricamente planteando intervalos de calificación.

#### ➤ Verificaciones

Con el fin de realizar una limpieza al conjunto de datos recolectados, se realizó una serie de verificaciones para identificar posibles errores. Según Kinnear & Taylor (2007) para realizar este procedimiento se deben lograr 3 actividades: la verificación de códigos extraños, la verificación de consistencia y la verificación de caso extremo.

a) Verificación de códigos extraños

En resumen, la verificación de códigos extraños es la identificación (si existen) de valores, en este caso de respuestas, que no corresponden al rango o conjunto de valores admisibles. Un ejemplo puede evidenciarse mediante la pregunta ¿Usted tiene licencia de conducir? Los valores que son posibles para dar respuesta son solamente dos: si o no. Sin embargo, por inconvenientes técnicos u otras razones es posible que dentro de las respuestas a la pregunta de ejemplo se encuentren valores diferentes a las respuestas establecidas.

La verificación de códigos extraños se realizó sobre la base de datos definida para el estudio, se consolidaron las preguntas en columnas y las respuestas de cada encuestado en filas, según corresponde. Para determinar si las respuestas se encuentran asignadas correctamente al rango definido, se clasifican las preguntas como abiertas o cerradas según corresponde. Esto permitió mediante la aplicación de un filtro, identificar de forma inmediata posibles errores de códigos extraños en las categorías “cerradas”. Para esta verificación también se consideró la posibilidad de aceptación de respuestas múltiples.

Para el caso de las preguntas abiertas, el proceso realizado fue similar, pero adicionalmente se contemplaron criterios que permitieron identificar respuestas que se encontraban fuera del rango aceptado. Una vez identificados los códigos extraños, fueron corregidos siempre que fuera clara la intención del encuestado. En los casos en que no fue posible identificar la intención del conductor, se procedió a tomar la respuesta como no contestada.

b) Consistencia

El proceso realizado para esta verificación incluyó un análisis de asociación entre las diferentes preguntas y respuestas, en donde el investigador identificó interrogantes que se asocian

a preguntas anteriores, por lo cual debe esperarse cierta coherencia entre las respuestas suministradas.

Como ejemplo se presenta el análisis realizado entre la pregunta No 7 en la cual se indaga si el encuestado consulta información habitualmente y la pregunta No 8 en la cual se consulta si hace uso de la información que consulta. En este caso, resulta que una persona que respondió que usa la información necesariamente debió realizar la consulta en algún momento, pero una persona que manifestó consultar la información no necesariamente está obligada a hacer uso de la información.

El resultado de esta verificación arrojó algunas respuestas que indicaban que el encuestado nunca realizaba consultas de la información, pero si usaba de la información en algún momento de sus viajes, lo cual genera una clara inconsistencia en sus respuestas. Esta inconsistencia no puede ser resuelta ya que no es clara la intención del encuestado o se evidencia una posible confusión en el entendimiento de la encuesta, por lo cual incluir dicha información podría generar errores en el análisis.

c) Caso extremo

Una verificación por caso extremo se realiza cuando existe una respuesta que está muy fuera de lo ordinario. Por ejemplo, un valor muy fuera del rango o que uno piense que estaría desproporcionado para la respuesta. En el caso de la presente investigación, al considerar rangos cualitativos definidos, no se presentaron errores asociados a esta verificación.

### ***3.3.2. Análisis de la información***

Una vez finalizada la limpieza, depuración y verificación de la información recolectada, se estableció la base de datos definitiva a partir de la cual se analizaron y generaron conclusiones en el desarrollo de la investigación. El *Apéndice G* presenta esta información base.

Para empezar, se realizó un análisis descriptivo básico, el cual consistió en calcular las frecuencias relativas, absolutas, mediana, moda y rango intercuartílico para las respuestas obtenidas a cada una de las interrogantes planteadas. De esta forma fue posible obtener una visión general del comportamiento de cada una de las variables definidas y se identificaron las características más relevantes del proceder de los conductores frente al uso de información de tráfico o de ruta.

Una vez se obtuvo el análisis individual de cada variable, se procedió a analizar su comportamiento con base en características generales de la muestra estudiada, para la cual se dividió a los encuestados en grupos por rango de edad, estrato socioeconómico y escolarización. Se definieron valores característicos identificando diferencias por ejemplo en la percepción de las tecnologías y en el uso y aceptación de la información en jóvenes y en adultos, se analizó la frecuencia y momento de consulta de la información por parte del conductor según el nivel socioeconómico o su formación académica.

Teniendo en cuenta que la concepción del instrumento de medición se planteó estableciendo propósitos definidos para cada una de las preguntas formuladas, una vez analizados los resultados anteriores, se segmentó la información recopilada en dos grupos. El primer grupo contiene información que permite describir y entender el comportamiento de los conductores, asociando sus preferencias para realizar sus consultas al proceso lógico que le lleva a la toma de decisiones. El segundo grupo contiene información de variables que permiten cuantificar el grado de aceptación de la información como la frecuencia de consulta de información y la medición sobre la periodicidad en que el conductor tiene la disposición a modificar sus recorridos con base en la información suministrada.

La segmentación antes mencionada incluyó una comprobación de la información levantada y la evaluación de los resultados de cada variable. La conformación de los subgrupos mencionados puede consultarse en el *Apéndice B*, en la columna “Análisis Profundo”, la cual categoriza las variables que fueron incluidas en la estimación de los escenarios de tasas de aceptación señalándolas mediante el enunciado “SI” y “NO” para el subgrupo de variables que describen las preferencias de los conductores.

Para las variables definidas como de afectación directa para la estimación de las tasas de aceptación, se realizó una evaluación por medio de la prueba de Chi-cuadrado de asociación, para la cual se planteó como hipótesis nula que las variables evaluadas son independientes y como hipótesis alterna que las variables evaluadas son dependientes, de esta forma fue posible precisar si las distribuciones de las variables en estudio difieren entre sí.

Adicionalmente se realizó un análisis de correlación con el propósito de medir la magnitud de la asociación de las diferentes variables en estudio, sin embargo, se encontró que el comportamiento de las variables no era lineal ni monótona, por lo cual los resultados de la correlación no describen con exactitud la relación entre las variables, lo cual se verá con mayor detalle en la sección de resultados.

### ***3.3.3. Definición de las tasas de aceptación de información de tráfico por parte del conductor para el caso de estudio del área metropolitana de Bucaramanga***

Con base en el análisis de información antes presentado, fue posible establecer la relación entre las diferentes variables estudiadas, lo que permitió identificar los supuestos del comportamiento del conductor en la muestra estudiada, así como su participación en la medición de las tasas de aceptación.

Para la definición de las tasas de aceptación se propusieron escenarios para evaluar diferentes hipótesis definidas por el investigador basándose en los resultados obtenidos en la encuesta. Los escenarios se construyeron con base en la observación del comportamiento de las variables en forma individual, lo que permitió establecer la importancia que tendría cada una y la forma en que contribuyen en la definición de las tasas de aceptación buscadas. De esta forma se definieron las variables que conforman los escenarios que permiten evaluar diferentes tasas de aceptación, soportadas en la información de las variables que tuvieron una vocación exclusivamente descriptiva, de acuerdo con la información recolectada en la encuesta.

Este primer ejercicio permitió definir un escenario elemental compuesto por información puntual sobre la aceptación de la información. El escenario No 1 llamado “medio”, se consideró debido a la posibilidad que se tiene de diferenciar claramente los dos subgrupos de la muestra en estudio mediante las respuestas obtenidas en las preguntas 4, 4.1 y 4.2, lo que permitió definir un escenario bajo una primera suposición de que quienes conocen la información necesariamente la usarán en sus desplazamientos y quienes no la conocen o no les interesa no lo harán.

Posteriormente se evaluaron diferentes escenarios adicionales, que fueron ajustados de la mano de variables adicionales. Se propuso el escenario No 2 “optimista”, el cual considera que el escenario anterior podría tener un aumento en la aceptación de la información, ya que algunas de las personas que manifestaron no usar o no conocer la información, podrían empezar a usarla bajo condiciones que aseguren un suministro de información confiable y útil, según los resultados obtenidos en la pregunta No 16.

Se construyeron escenarios adicionales llamados “realistas” que ajustan la suposición inicial del escenario “medio” de acuerdo con lo manifestado por los conductores en preguntas complementarias. El escenario “realista 1”, contempla un ajuste realizado por medio de la variable

de momento de consulta asociada a la pregunta No 9, en la cual se considera que los conductores que aceptarán la información de tráfico serán quienes manifestaron específicamente que usaban la información en todos y en la mayoría de los viajes que realizan.

El escenario “realista 2”, se basó en el escenario “realista 1”, pero realizando un ajuste adicional en el que se considera que la información de tráfico será aceptada únicamente por quienes manifestaron usar la información en todos y la mayoría de sus viajes, y además declararon que la información es útil, según lo expuesto por la variable medida mediante la pregunta No 11, de forma que se excluyó la participación de todos los demás conductores.

El escenario “realista 3” propone un ajuste mediante la suposición de que la información es usada exclusivamente por los conductores que siguen las instrucciones relacionadas con la información de tráfico todas y la mayoría de las veces que conducen, de acuerdo con lo registrado para la variable de frecuencia de consulta asociada a la pregunta 12.

Como escenarios de referencia para la evaluación de los resultados de escenarios posteriores, se plantearon dos escenarios, el primero asume una aceptación nula de información por parte de los conductores, estableciendo un escenario 0 o “base”, y un escenario 100 de “referencia” en donde se presume que todos los conductores aceptarán y usarán la información. La *Tabla 2*, presenta una tabla resumen de los escenarios propuestos.

**Tabla 2**

*Escenarios de suministro de información propuesto para la evaluación.*

| ÍTEM | NOMBRE DEL ESCENARIO | % DE ACEPTACIÓN | CONSIDERACIONES  |
|------|----------------------|-----------------|--|
| 1    | Base                 | 0%              | Escenario de referencia asumiendo que ningún conductor acepta la información |

|   |            |      |   |
|---|------------|------|---|
| 2 | Referencia | 100% | Escenario de referencia asumiendo que todos los conductores aceptan la información  |
| 3 | Medio      | 50%  | Escenario basado en las respuestas obtenidas de las preguntas 4, 4.1 y 4.2, derivados de las diferencias de los subgrupos de la muestra en estudio.   |
| 4 | Optimista  | 87%  | Escenario basado en los resultados obtenidos en la pregunta No 16, considera que el escenario medio podría tener un aumento en la aceptación de la información, agregando como posibles usuarios a los encuestados que manifestaron no usar o no conocer la información.  |
| 5 | Realista 1 | 29%  | Escenario basado en los resultados obtenidos en la pregunta No 9, contempla un ajuste realizado por medio de la variable de momento de consulta la cual se considera que los conductores que aceptan la información la usan en todos y en la mayoría de los viajes que realizan   |
| 6 | Realista 2 | 19%  | Escenario basado en los resultados obtenidos en la pregunta No 11, tomando como referencia el escenario “realista 1”, pero agregando la consideración de que la información de tráfico será aceptada únicamente por quienes manifestaron usar la información en todos y la mayoría de sus viajes, y además declararon que la información es útil. |
| 7 | Realista 3 | 37%  | Escenario basado en los resultados obtenidos en la pregunta No 12 mediante la suposición de que la información es usada exclusivamente por los conductores que siguen las instrucciones relacionadas con la información de tráfico todas y la mayoría de las veces que conducen.  |

---

*Nota. Elaboración propia.*

### **3.4. Resultados**

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos de la medición y estimación de la tasa de aceptación o desobediencia del usuario ante el suministro de información de tráfico. Se

presenta el procesamiento y análisis realizado a las respuestas obtenidas a partir de la aplicación de la encuesta realizada para identificar las variables que afectan el comportamiento de los conductores y los procedimientos posteriores llevados a cabo que permitieron definir la tasa de aceptación buscada.

#### ***3.4.1. Resultados de la preparación y verificación de la información recolectada.***

Siguiendo el procedimiento establecido para el levantamiento de información, en un periodo de 45 días fue posible recolectar un total de 350 entrevistas realizadas a los conductores de vehículos livianos con licencias de conducción vigente que manifestaron haber conducido en el mes previo a la aplicación de la encuesta. Finalizadas las revisiones y verificaciones antes expuestas, se encontraron 12 preguntas que tenían una respuesta o espacio en blanco en una o más variables de interés, por lo cual no se consideraron en el análisis realizado. De la misma forma se identificaron 12 preguntas más que presentaban inconsistencias entre las respuestas dadas por un mismo encuestado, las cuales también fueron eliminadas ante la imposibilidad de contactar nuevamente a los encuestados o identificar su intención de respuesta. No se encontraron encuestas con poca varianza, lo que indica que no hay suficiente evidencia para pensar que haya algún conductor que no haya contestado la encuesta con seriedad, tampoco se encontró que existieran encuestados que no pertenecen a la población en estudio.

Así las cosas, del total de las encuestas realizadas, se determinó que 326 el equivalente al 93% de las encuestas recolectadas, se encontraban en condiciones óptimas para su análisis. Las 24 encuestas restantes fueron descartadas y retiradas del estudio debido a que se encontró que su inclusión podría afectar significativamente los resultados buscados para la investigación.

Por otra parte, se aclara que las encuestas retiradas del estudio corresponden a formularios para los cuales no fue posible subsanar los errores encontrados. Sin embargo, se encontraron

respuestas inexactas para las cuales la intensidad de respuesta del encuestado era clara para el investigador, por lo cual fue posible identificar y corregir el registro para ser incluido en el análisis.

### **3.4.2. Validación**

Con el fin de conocer las similitudes de la muestra en estudio con la población de interés, y considerando que no se contó con información sobre la población que permitiera obtener una estimación del comportamiento real, se propuso examinar la forma en que se distribuye la muestra en estudio y estudiar si su comportamiento es similar al encontrado a nivel nacional en relación a la adquisición de licencias de conducción considerando el género y a nivel metropolitano mediante las edades de la población.

Para tal fin se propuso realizar una prueba de bondad de ajuste Chi-cuadrado, entendiendo que la información que disponemos para tal fin proviene de fuentes confiables y es representativa, lo cual nos permite llevar a cabo la comparación mencionada. Para el análisis realizado se encontró que para un nivel de confianza del 99%, la población por edades del área metropolitana se distribuye igualmente que la muestra en estudio.

Adicionalmente ya que no se contaba con una distribución por género de las licencias de conducción del área metropolitana de Bucaramanga, se tomó información brindada por el RUNT sobre la distribución de licencias de conducción por género a nivel nacional y se realizó el análisis para verificar si la distribución de la muestra en estudio se ajusta a la distribución nacional. Se encontró que para un nivel de confianza de 95%, la muestra en estudio se distribuye igualmente que el número de licencias de conducción a nivel nacional.

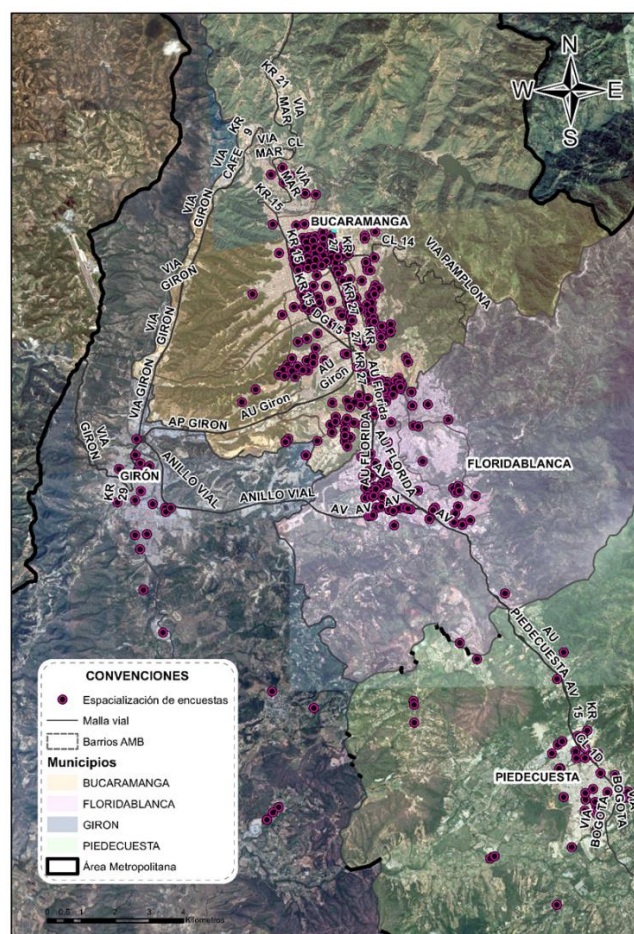
Como conclusión encontramos que la muestra en estudio se distribuye de forma similar al comportamiento encontrado en la distribución por edades del área metropolitana de Bucaramanga

y al número de registros de licencias de conducción por genero a nivel nacional. El *Apéndice H* presenta con detalle los resultados antes expuestos.

Para complementar el análisis antes realizado, se estudió también la distribución espacial de la ubicación de las viviendas de los conductores encuestados en el área metropolitana. En la *Figura 5* se muestra la especialización realizada considerando el municipio y el barrio, como puede verse fue posible contar con encuestados pertenecientes a todos los municipios del AMB, y se encuentra una distribución aleatoria en la distribución de las viviendas de la muestra en estudios.

### Figura 5

*Distribución espacial de la ubicación de las viviendas de los conductores encuestados.*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

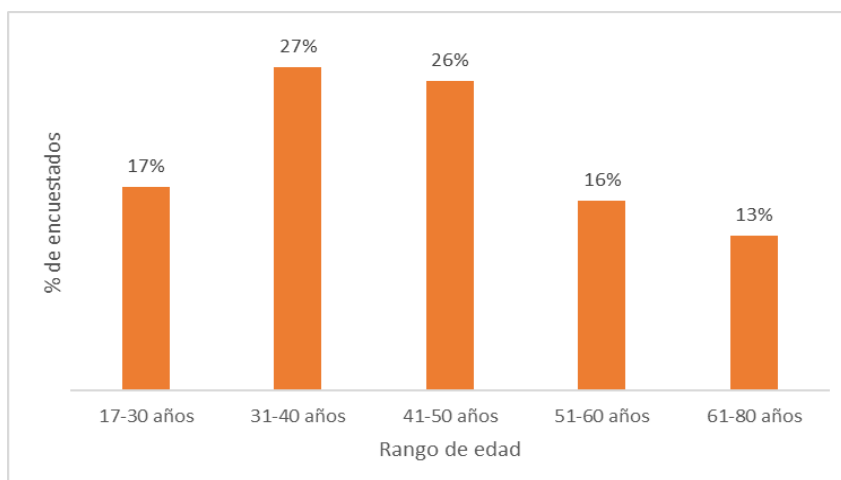
### ***3.4.3. Análisis general de la información recopilada.***

Como primera medida para el análisis general de la información recopilada, se realizó el cálculo de valores base como la moda, frecuencia relativa y absoluta relacionados a las respuestas obtenidas para cada una de las preguntas realizadas. A continuación, se presentarán los principales resultados del levantamiento de información, mostrando en primera medida las características socioeconómicas de los encuestados exponiendo los resultados de la Fase 3. Información general personal de la encuesta, y posteriormente se presentarán los resultados de la Fase 1. Hábitos de conducción del usuario y la Fase 2. Comportamiento del usuario frente al uso de ATIS.

#### **a) Fase 3. Información general personal**

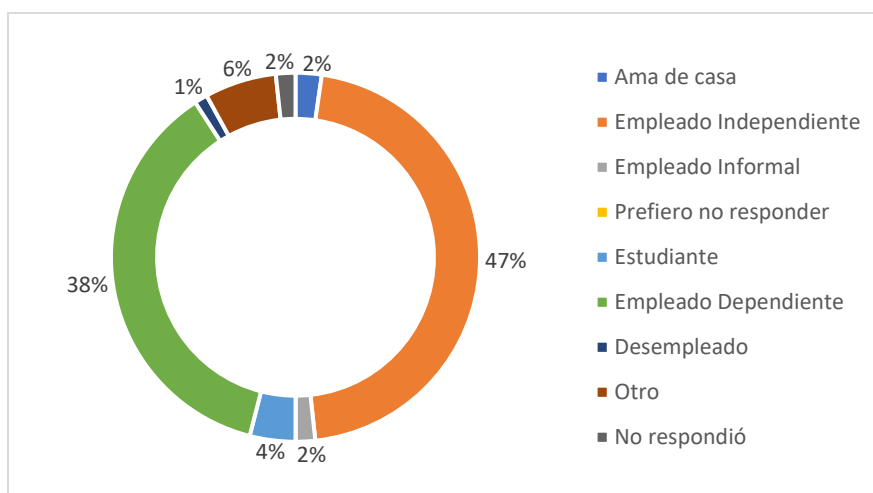
Esta sección recopiló información socioeconómica de los conductores encuestados. Se indagó sobre la edad, el género, la ocupación el nivel socioeconómico, la escolarización, y el municipio y barrio de residencia de los encuestados. La anterior caracterización tiene como principal objetivo identificar si existen diferencias en el comportamiento de determinados subgrupos de la muestra en términos de edades, género o escolaridad, lo que permitirá posteriormente identificar preferencias en la población muestreada y en su uso de las ATIS. A continuación, se presenta la composición de la muestra para cada una de las características mencionadas:

Se encontró que el 79% de los encuestados son hombres y el 21% restante son mujeres y que las edades de los conductores oscilan entre los 17 y los 78 años. Ya que se desea conocer y entender el comportamiento de la muestra en estudio, fue necesario crear segmentos de muestra de acuerdo con la edad de los participantes, con el propósito de identificar comportamientos comunes respecto al uso de las ATIS y la información de ruta. Se identificaron 5 intervalos de edades, la *Figura 6* presenta la distribución por rango de edad de los conductores en estudio.

**Figura 6***Distribución por rango de edad*

*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

Se consultó a los encuestados sobre su ocupación actual, los resultados presentados en la *Figura 7* muestran que los participantes principalmente son empleados dependientes e independientes.

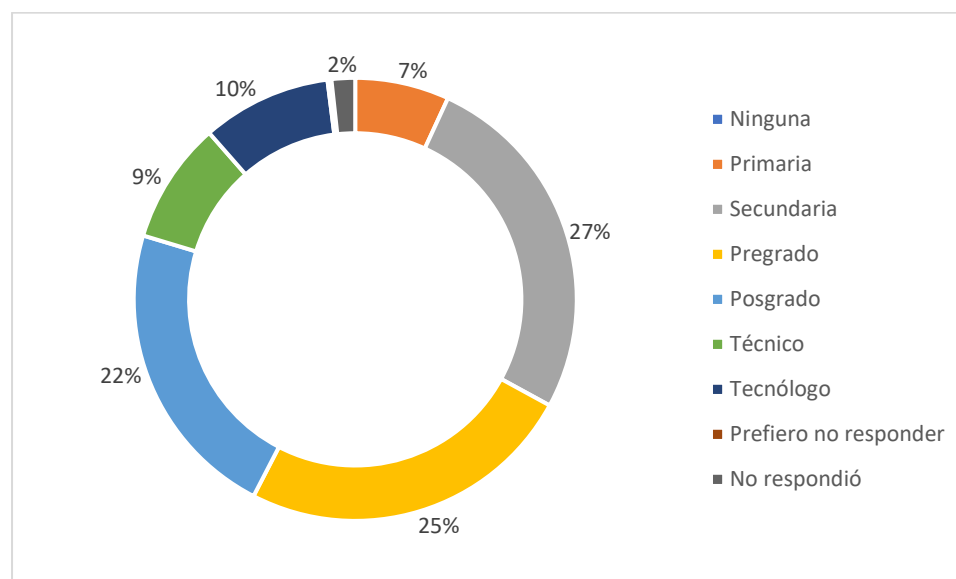
**Figura 7***Composición de la muestra en estudio por ocupación*

*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

Se indagó sobre el grado de escolarización de los encuestados, en la *Figura 8* puede verse que la muestra se compone principalmente de individuos con educación a nivel de secundaria, pregrado y posgrado.

### Figura 8

*Composición de la muestra en estudio por escolarización*

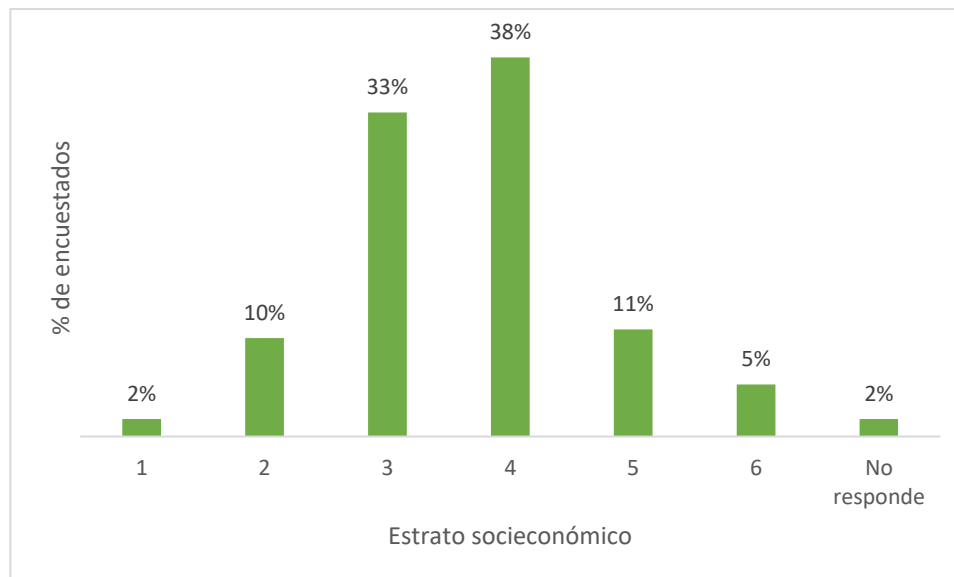


*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

También se preguntó a los encuestados sobre el nivel socioeconómico al cual pertenecían. La *Figura 9* muestra la composición de la muestra por estrato, en donde puede verse que la mayoría de los participantes pertenecen a los estratos 3 y 4.

**Figura 9**

*Composición de la muestra en estudio por estrato*



*Nota. Elaboración propia.*

Por último, se le consultó a los encuestados sobre su lugar de residencia. La *Tabla 3* muestra la proporción de encuestados por Municipio y en la *Figura 5* encontrará especializada la concentración de las viviendas de los conductores, ubicada por barrios en los diferentes municipios del área metropolitana de Bucaramanga.

**Tabla 3**

*Número de encuestados por municipio del área metropolitana de Bucaramanga*

| Municipio            | # de Encuestados | % de Encuestados |
|----------------------|------------------|------------------|
| <b>Bucaramanga</b>   | 202              | 59%              |
| <b>Girón</b>         | 25               | 7%               |
| <b>Floridablanca</b> | 68               | 20%              |
| <b>Piedecuesta</b>   | 49               | 14%              |
| <b>Total</b>         | 344              | 1                |

*Nota. Elaboración propia.*

- Análisis de la información obtenida de la muestra v/s la población general del AMB

Se realizó un análisis para identificar si la muestra seleccionada se distribuyó efectivamente en el área metropolitana de Bucaramanga. Para empezar, se analizó si la distribución de encuestas es similar a la distribución del parque automotor y la población de los diferentes municipios. A continuación, se presenta dicha información en la Tabla 4.

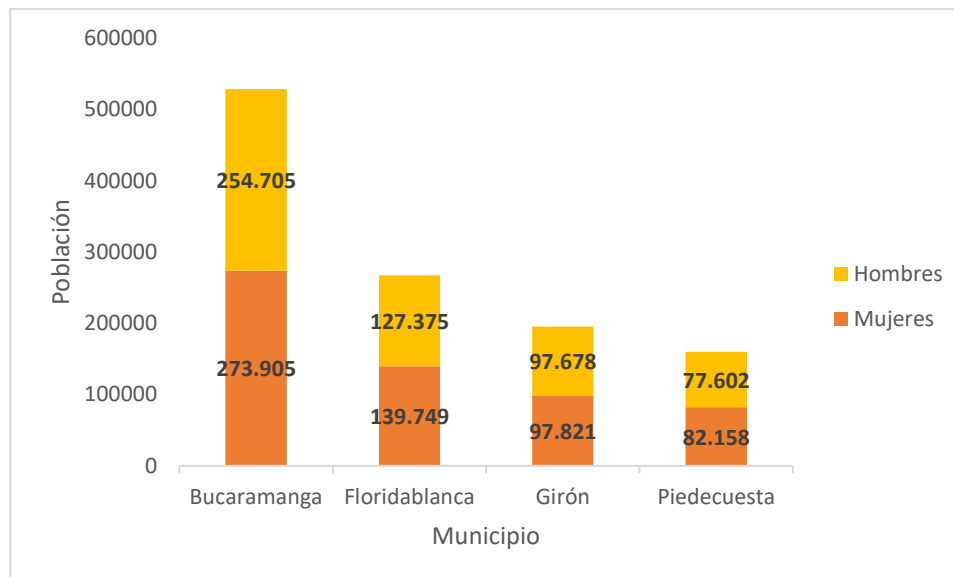
**Tabla 4**

*Parque automotor matriculado en el área metropolitana de Bucaramanga*

| <b>Vehículo /<br/>Municipio</b> | <b>Parque automotor Año 2018</b> |        |             |               |         |
|---------------------------------|----------------------------------|--------|-------------|---------------|---------|
|                                 | Bucaramanga                      | Girón  | Piedecuesta | Floridablanca | AMB     |
| <b>Automóvil</b>                | 101.964                          | 27.434 | 1.541       | 29.472        | 160.411 |
| <b>Campero</b>                  | 17.674                           | 2.382  | 303         | 3.524         | 23.883  |
| <b>Camioneta</b>                | 36.220                           | 12.243 | 809         | 10.901        | 60.173  |
| <b>Total</b>                    | 155.858                          | 42.059 | 2.653       | 43.897        | 244.467 |
| <b>%</b>                        | 64%                              | 17%    | 1%          | 18%           | 100%    |

*Nota. Elaboración propia con base en las cifras del parque automotor matriculado en el área metropolitana de Bucaramanga con corte a diciembre de 2018, publicada por la dirección de tránsito de Bucaramanga. Recuperado de:*

*<https://www.transitobucaramanga.gov.co/files/2019/estadisticas/parque-automotor-area-metropolitana-corte-31-diciembre-2018.png>.*

**Figura 10***Población por Municipio y Género (2018)*

*Nota.* Elaboración propia a partir de información tomada del Observatorio Metropolitano Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB). Tomado de:

<http://www.observatoriometropolitano.com.co:8080/Indicador/Index/7>

Los resultados obtenidos indican que la población total del área metropolitana de Bucaramanga para el año 2019 es de 1'150.993 Habitantes, de los cuales el 48.4% son hombres y el 51.6% son mujeres. La distribución por municipios está encabezada por Bucaramanga que concentra el 46% de la población, Floridablanca el 23%, Girón 17% y Piedecuesta un 14%. (Área Metropolitana de Bucaramanga, s.f.) Para el caso del parque automotor de vehículos livianos tipo automóvil, campero y camionetas, se encontró que Bucaramanga cuenta con un 64% del total de los vehículos livianos del área metropolitana, Floridablanca un 18%, Girón el 17% y Piedecuesta el 1%.

Se encontró que la distribución de la ubicación de las viviendas por municipio de los encuestados es similar a la distribución de la población del AMB por municipio, para todos los casos exceptuando Girón, ya que la encuesta obtuvo una menor participación de los habitantes de este municipio. Sin embargo, al estudiar la distribución de la población por municipio para el caso de Bucaramanga, Floridablanca y Piedecuesta para un nivel de confianza del 90%, se encontró que se distribuye de forma similar que la muestra en estudio.

Al realizar un análisis similar en el cual se comparó la distribución del parque automotor por municipio y la distribución de la muestra por municipio, se encontró que para todos los casos exceptuando Piedecuesta existe una distribución semejante. Para un nivel de confianza del 99% se encontró que la muestra en estudio se distribuya de forma similar al parque automotor de los municipios de Bucaramanga, Girón y Floridablanca. El *Apéndice H* presenta con detalle los resultados relacionados con las comparaciones de las distribuciones mencionadas.

b) Fase 1. Hábitos de conducción del usuario.

En la primera fase de la encuesta, mediante tres preguntas se buscó identificar los principales hábitos de conducción de los encuestados y el grado de uso del vehículo particular para la ejecución de sus desplazamientos.

La primera interrogante consulta al encuestado sobre el modo en el cual hace sus desplazamientos. Se encontró que el 59% de los encuestados usa como modo principal el automóvil, el 25% usa camionetas, el 6% un campero y el 11% restante usa varios de los vehículos antes mencionados. Posteriormente se consultó sobre el número de veces por semana que realiza viajes en el vehículo mencionado, se encontró que el 66% de las personas hace recorridos en su vehículo más de 4 veces a la semana, el 11% entre 4 y 5 veces a la semana el 21% entre 2 y 3 veces y el 3% restante solo realiza un viaje por semana.

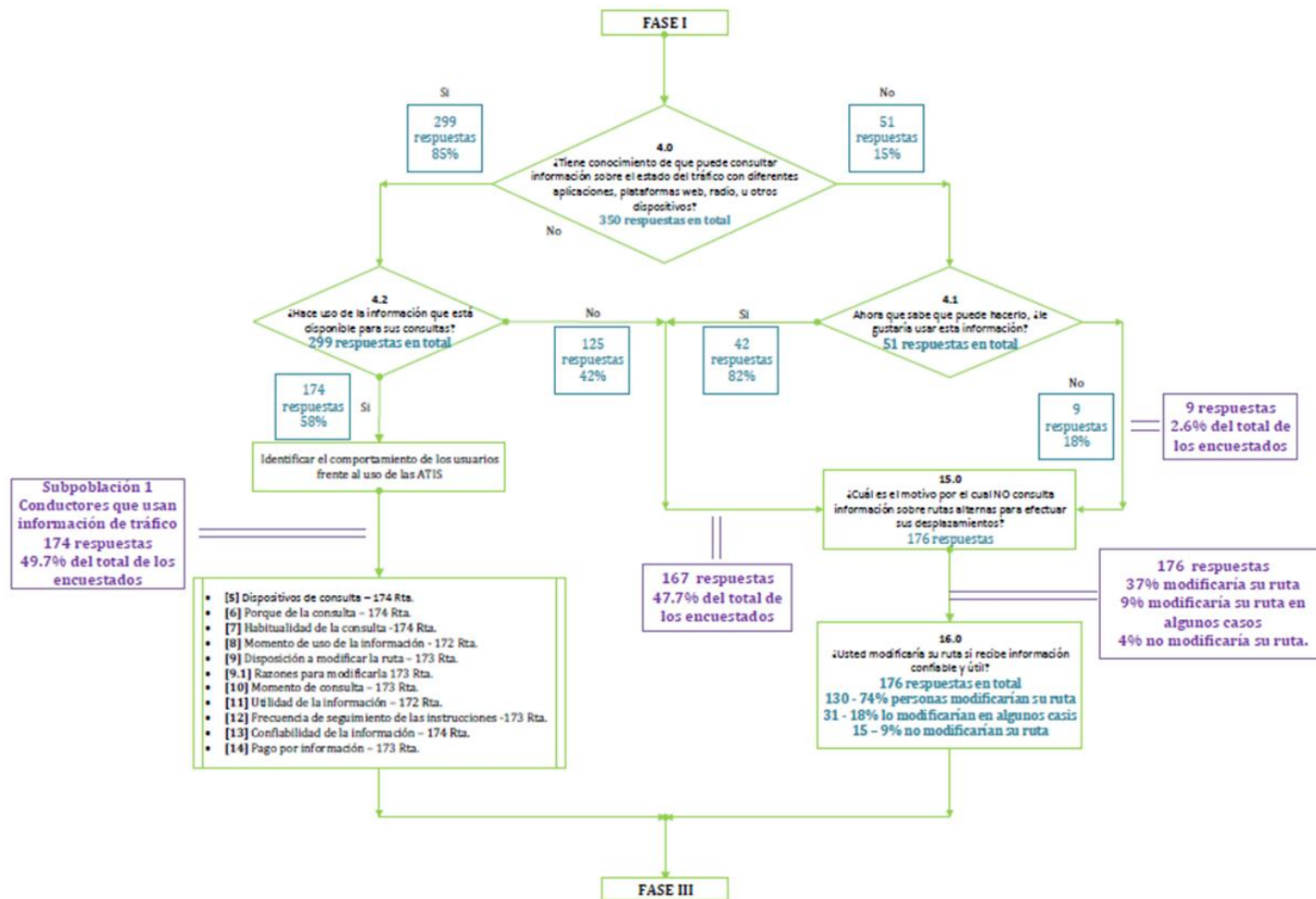
Al consultar a los encuestados por el promedio de duración de los recorridos realizados, se encontró que un 41% cuenta con periodos de recorrido entre 16 a 30 minutos, el 29% entre 31 y 60 minutos. Un 19% entre 5 y 15 minutos, y el 11% realiza recorridos con una duración superior a 60 minutos. En ningún caso los encuestados manifestaron realizar recorridos menores a 5 minutos.

c) Fase 2. Comportamiento del usuario frente al uso de ATIS

Esta fase de la encuesta se formuló con el fin de conocer si los conductores del AMB conocen, y usan las diferentes herramientas tecnológicas relacionadas con suministro de información de tráfico al usuario, y si estas herramientas influyen en su decisión de la selección de ruta de los conductores para efectuar sus desplazamientos. A continuación, la *Figura 11* presenta el diagrama de flujo que explica la secuencia de las preguntas realizadas y el porcentaje de respuesta obtenido en cada una de ellas, con el fin de orientar al lector en los resultados obtenidos.

Figura 11

Diagrama a de flujo que presenta las respuestas asociadas a la fase 2 de la encuesta.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en la figura anterior, se identificaron los conductores que tenían conocimiento sobre la posibilidad de consultar información del estado del tráfico, a través de las diferentes opciones disponibles para tal fin. Se encontró que el 85% de los encuestados conocen las aplicaciones y/o dispositivos y el 15% restante no tienen este conocimiento.

A los conductores que manifestaron conocer estas tecnologías, se les consultó si usan la información que proveen las diferentes aplicaciones y/o dispositivos. Se encontró que 174 encuestados conocen y hacen uso de la información y los 125 restantes aun cuando tienen conocimiento de la información, no hacen uso de esta. Las personas que no hacen uso de la información se remitieron a una sección posterior que buscó identificar las razones por la cuales la información no es usada y consultada, en donde se incluyeron también los encuestados que manifestaron no tener conocimiento sobre las tecnologías en cuestión.

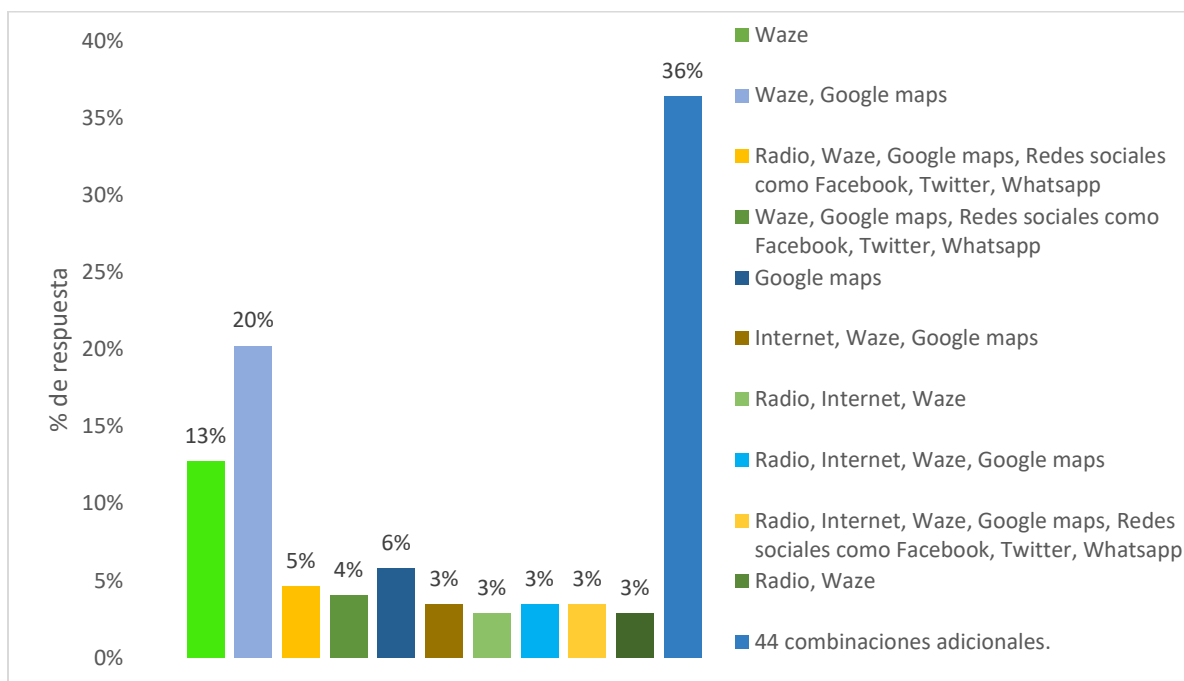
De esta forma se identificaron dos subgrupos de la muestra, uno con conocimiento e interés en usar aplicaciones o dispositivos para consulta de información de tráfico, y el otro que carece de estas dos características, encontrando que un total de 49.7% de los encuestados hacen uso de plataformas o aplicaciones que brindan información de tráfico. A continuación, se presentan los principales hallazgos de acuerdo con los subgrupos antes mencionados.

➤ Participantes que hacen uso de las aplicaciones ATIS

Para empezar, se consultó sobre los dispositivos que los conductores conocen para realizar consultas sobre información de rutas disponibles para realizar sus recorridos. En la *Figura 12* se presenta el porcentaje de respuesta obtenido en las diferentes categorías, encontrando que los participantes tienen un entendimiento amplio sobre los dispositivos de consulta, dejando ver que su conocimiento no se limita a una aplicación de forma exclusiva, sino que es posible que se apoyen en diferentes plataformas para obtener la información de tráfico.

**Figura 12**

*Principales dispositivos o aplicaciones usadas por los encuestados para consultar información de ruta.*



*Nota. Elaboración propia.*

Diferenciando las respuestas obtenidas por tipo de aplicación o dispositivo, se encontró que el 73% de los encuestados tiene conocimiento de la aplicación Waze como una opción para sus consultas, el 63% conoce Google Maps, mientras que el 37% la información radial, un 33% tiene conocimiento de que puede consultar información en internet, seguido de un 26% que conoce las redes sociales como una opción para sus consultas. Como se puede ver, en menor medida se tiene conocimiento de la televisión, el sistema de ruta dentro del vehículo y otros sistemas de navegación de tráfico diferentes a los ya mencionados.

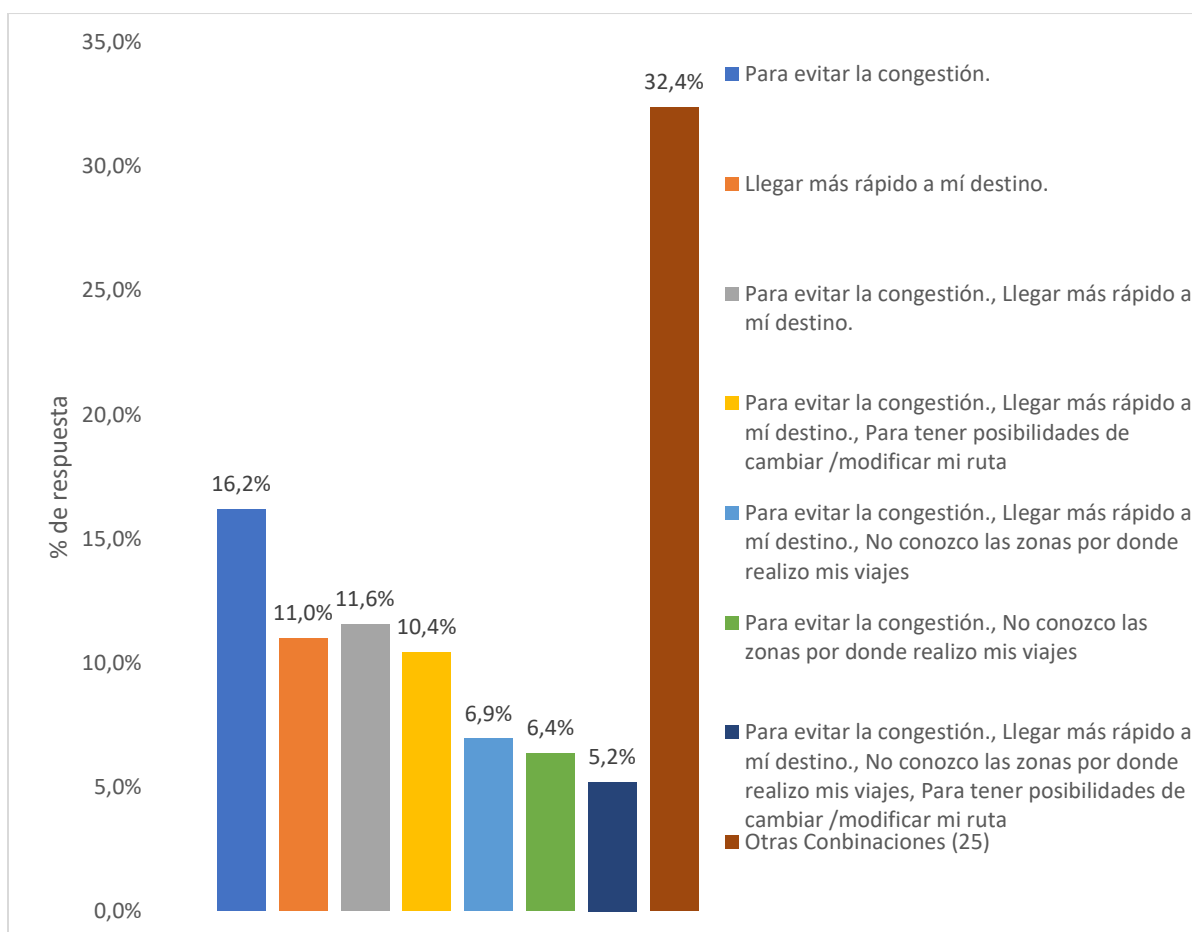
Una vez identificada la forma de consulta de la información, se procedió a indagar sobre la razón por la cual se realizan las consultas, la *Figura 13* muestra las principales respuestas

brindadas por los encuestados, los cuales al igual que en el caso anterior manifestaron su interés para varias de las opciones disponibles.

Nuevamente diferenciando las respuestas por motivo de consulta, se encontró que el 71% de los encuestados realiza consultas para evitar la congestión, el 61% para llegar más rápido a su destino, el 32% manifestó no tener conocimiento de los lugares o zonas por donde realiza sus desplazamientos, un 9% elige caminos diferentes cada día, y finalmente el 6% restante lo consulta por curiosidad.

### Figura 13

*Razones por las cuales los encuestados realizan consultas de información de tráfico.*

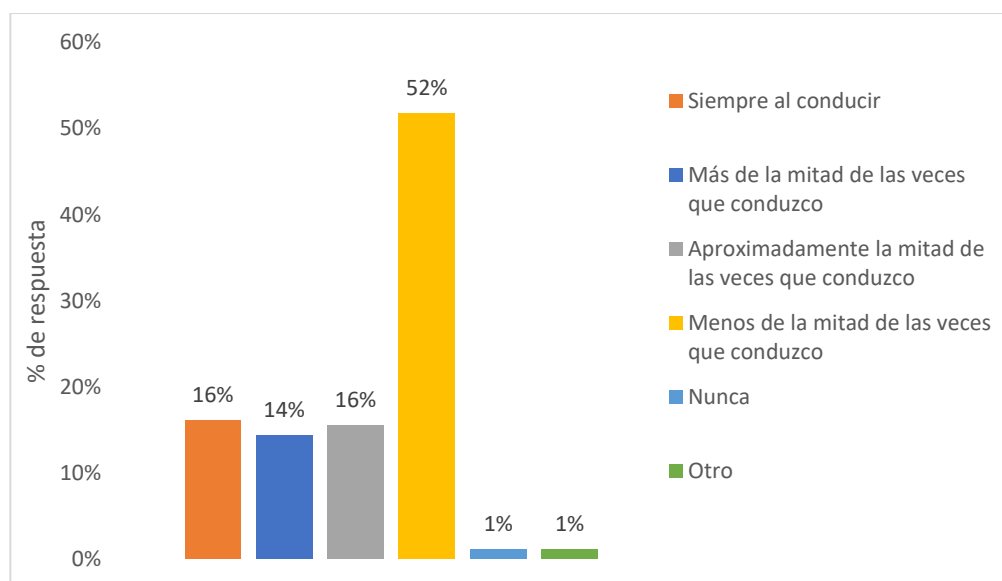


*Nota. Elaboración propia.*

Posteriormente se consultó sobre qué tan habitual es la consulta de información sobre diferentes trayectos para efectuar los desplazamientos, se encontró que el 52% refirió que usa la información menos de la mitad de las veces que conduce, el 16% la mitad de las veces al conducir, un 16% usa las aplicaciones siempre al conducir, el 14% usa la información más de la mitad de las veces al conducir y el 2% restante dijo no usar la información cuando conduce o señaló más de una de las opciones disponibles. En la *Figura 14* se puede ver la relación de las respuestas obtenidas.

**Figura 14**

*Habitualidad en la consulta de información de los encuestados.*



*Nota. Elaboración propia.*

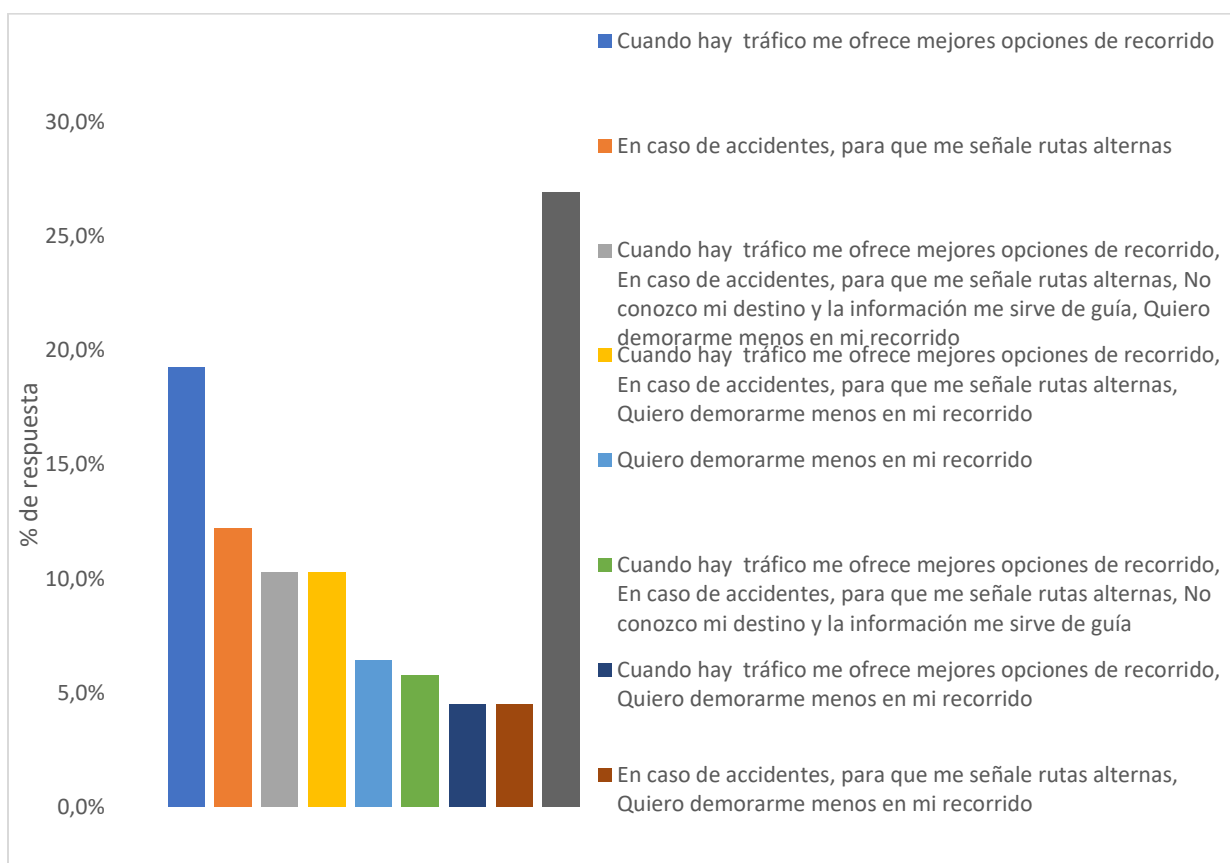
También se preguntó sobre el momento durante el viaje en el cual hace uso de la información de ruta que es consultada por el usuario y se encontró que un 44% de las consultas se usan ocasionalmente, un 28% de forma frecuente, un 23% indicó que usa la información a lo largo de todo el viaje y el 6% restante manifestó no usar la información durante el viaje.

Así mismo, se consultó a los encuestados si es usual que modifiquen la ruta para sus desplazamientos cuando consultan información y se encontró que el 25% de los encuestados siempre modifican su ruta de acuerdo con la información brindada, el 33 % lo hace ocasionalmente, otro 33% cambia su ruta la mayoría de las veces y el 9% restante nunca lo hace.

Con el fin de identificar los motivos por los cuales el conductor modifica su ruta según lo expuesto anteriormente, se consultó a los encuestados sobre las razones de su elección, encontrando que, igual que en preguntas anteriores los conductores seleccionaron múltiples opciones para justificar su decisión, la *Figura 15* muestra las respuestas más relevantes.

### Figura 15

*Razones por las cuales los encuestados modifican su ruta.*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

Diferenciando las respuestas por opción única, se encontró que el 61% de los encuestados indicó que su principal motivo para la selección es cuando hay presencia de tráfico y la información proporcionada ofrece mejores opciones de recorrido, un 52% de los participantes señalo que se usa en caso de que existan accidentes, para señalar rutas alternas que permitan sortear los inconvenientes en el recorrido. El 40% de los encuestados señaló que esperan demoras menores en el tiempo de recorrido, el 28% señaló que es usada en caso de desconocimiento del destino, como opción de guía, finalmente el 11% señaló no tener preferencias en las rutas seleccionadas.

Se preguntó a los encuestados sobre el momento en que se realiza la consulta sobre información de ruta, se encontró que el 37% de los encuestados consulta la información inmediatamente al iniciar el viaje, el 23% realiza la consulta antes y durante el viaje, el 21% realiza consultas durante su viaje, y el 18% restante lo hace mucho antes de iniciar el viaje.

De forma complementaria a la consulta realizada sobre el momento en que se realiza la consulta, se les preguntó a los encuestados sobre la utilidad de la información que reciben con relación a las rutas disponibles. El 76% manifestó que la información es útil, para el 24% ocasionalmente es útil y ninguno de los conductores considero como no útil la información.

Se preguntó a los encuestados sobre la frecuencia con que siguen las instrucciones brindadas por el dispositivo que informa sobre rutas disponibles, se encontró que el 50% de los encuestados consulta la información la mayoría de las veces al conducir, el 24% lo hace todas las veces al conducir, el 16% sigue las instrucciones la mitad de las veces al conducir y el 10% restante lo hace pocas veces al conducir.

De igual forma al indagar sobre la percepción de confiabilidad que tienen los conductores sobre la información que consultan de rutas disponibles para cubrir sus desplazamientos, se

encontró que para el 70% de los conductores la información brindada es confiables, un 30% considera que ocasionalmente es confiable y el 1% restante opina que no es confiable.

Finalmente, entendiendo que el suministro de información de tráfico en las diferentes etapas del viaje supone un gasto atribuido al usuario en cuanto a requerimiento de acceso a internet y a la información propia de ubicación y desplazamientos, se les preguntó a los encuestados si realizaban pagos por la información de tráfico que consultaban. Se encontró que un 66% de los conductores no consideran que realicen un pago directo por la información y el 34% restante si consideran realizar pagos.

➤ Participantes sin conocimiento o uso de las aplicaciones ATIS

Para empezar, se presenta exclusivamente los resultados asociados al 15% (51) de los encuestados que como se mencionó anteriormente afirmaron no conocer los diferentes dispositivo o aplicaciones para consultar información de tráfico, a los cuales se les preguntó si ahora que sabían de la existencia de estas estaban interesados en usar la información. El 82% (42) de los participantes de dicho grupo manifestaron que sí les gustaría usar esta información y el 18% (9) restante indicaron no están interesados.

Al subgrupo antes mencionado, se sumó el 35.7% (125) de los participantes que, aunque manifestaron inicialmente tener conocimiento de las diferentes tecnologías, prefieren no usar la información disponible. De esta forma se conformó un subgrupo con un total de conductores de 50.3% del total de los encuestado, los cuales conforman el subgrupo de individuos que no usan plataformas o aplicaciones orientadas a brindar información de viaje a los conductores.

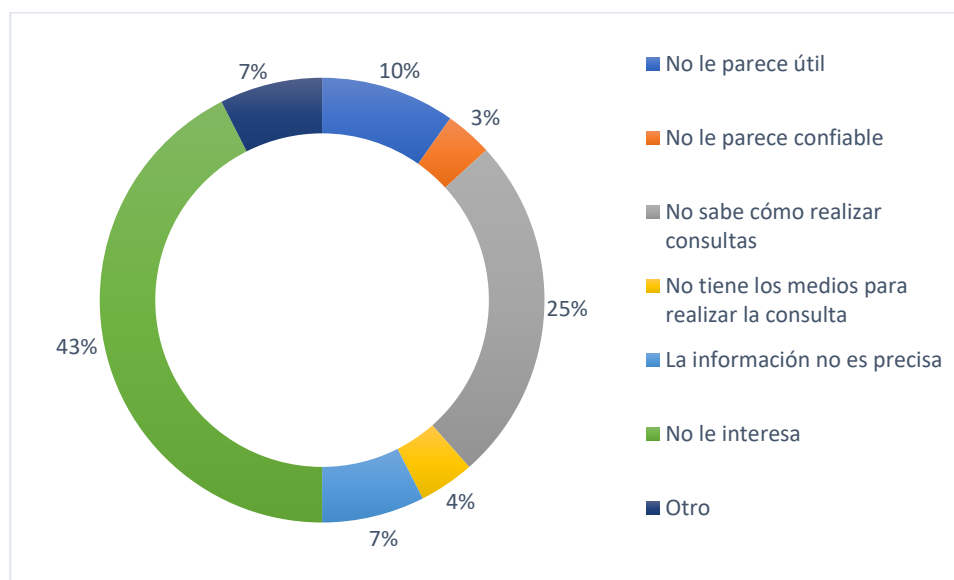
El interés en esta sub-grupo de estudio se centró en conocer los motivos por los cuales no consultaban la información sobre rutas alternas para desplazar sus desplazamientos y en saber si

bajo condiciones de confiabilidad y utilidad, estarían dispuestos a cambiar de opinión y usar las tecnologías.

La *Figura 16* presenta las categorías y porcentaje de respuesta atribuidas a los motivos por los cuales los participantes no consultan la información de ruta, encontrando que la opción más seleccionada fue “no le interesa” con un 43% de participación, seguido de “no sabe realizar consultas con un 25% y “no le parece útil con un 10% de respuestas.

### Figura 16

*Motivo por el cual no consulta la información.*



*Nota. Elaboración propia.*

En la opción “Otros” de la misma pregunta, los participantes tuvieron la oportunidad de manifestar motivos adicionales a los sugeridos por el investigador, entre los cuales los encuestados relacionaron falta de conocimiento de la información, el no requerimiento de la información por previo conocimiento de las posibles rutas, la falta de necesidad por poco tráfico en el sector o recorridos muy cortos. También se mencionó que las aplicaciones son usadas fuera del área

metropolitana en ciudades más grandes, y por último, no tener la posibilidad de consulta por falta de los medios necesarios para realizarla.

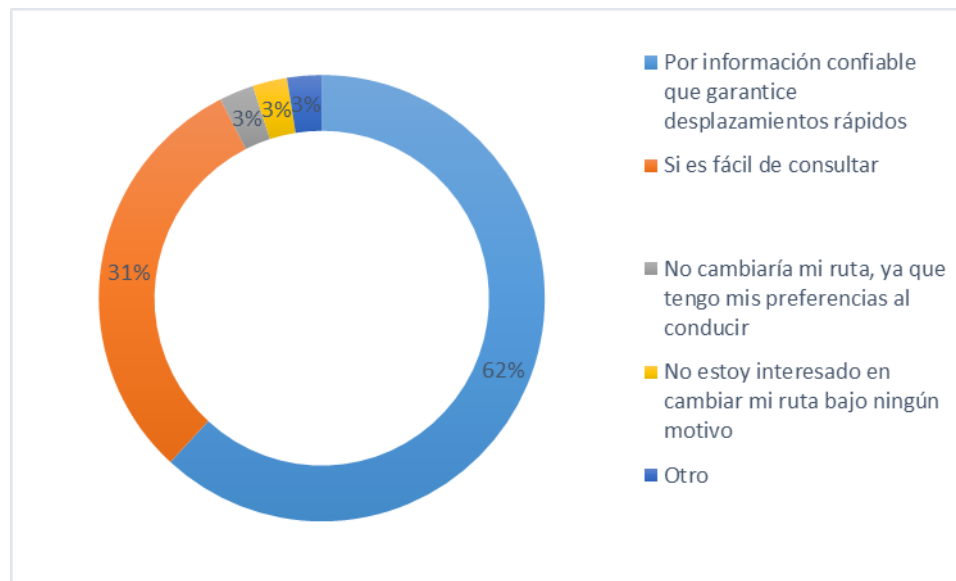
Respecto a la percepción de confiabilidad y utilidad de las aplicaciones ATIS por parte de la encuestados, se les preguntó a los encuestados que tan útil consideraban podía ser recibir la información y si creían que había posibilidades de aceptar la información para modificar sus rutas. Con esto se buscó identificar opciones de mejora en la implementación de este tipo de tecnologías con el propósito de identificar mecanismos para aumentar el grado de penetración de esta información entre los conductores.

Por tanto, se les preguntó a los encuestados si modificarían su ruta al recibir información confiable y útil. Se encontró que el 74% de los encuestados están dispuestos a modificar su ruta, el 18% lo consideraría en algunos casos y el 9% restante manifestó que no cambiaría su comportamiento bajo estas circunstancias.

Finalmente, se les preguntó a los conductores sobre las condiciones bajo las cuales este subgrupo estaría dispuesto a modificar sus rutas para efectuar sus desplazamientos. Se encontró que el 62% de los encuestados modificarían su ruta bajo condiciones con información confiable que garantice desplazamientos rápidos, un 31% manifiesta que lo harían si es fácil de consultar, un 3% manifiesta que no cambiaría la ruta seleccionada ya que cuentan con preferencias definidas para conducir, otro 3% manifiesta que no cambiaría su ruta bajo ninguna circunstancia y finalmente el 3% restante relacionó otras razones como inseguridad y la posibilidad de encontrar de congestión vial o accidentes en sus desplazamientos. La *Figura 17* relaciona los resultados obtenidos.

**Figura 17**

*Motivo por el cual no consulta la información.*



*Nota. Elaboración propia.*

El soporte de los resultados relacionados con el análisis general de la información recopilada, pueden consultarse en el *Apéndice I*, en donde se relaciona en detalle el procedimiento realizado para la obtención de la información presentada.

#### ***3.4.4. Análisis de la información de comportamiento del usuario frente las ATIS a partir de las características generales de la muestra.***

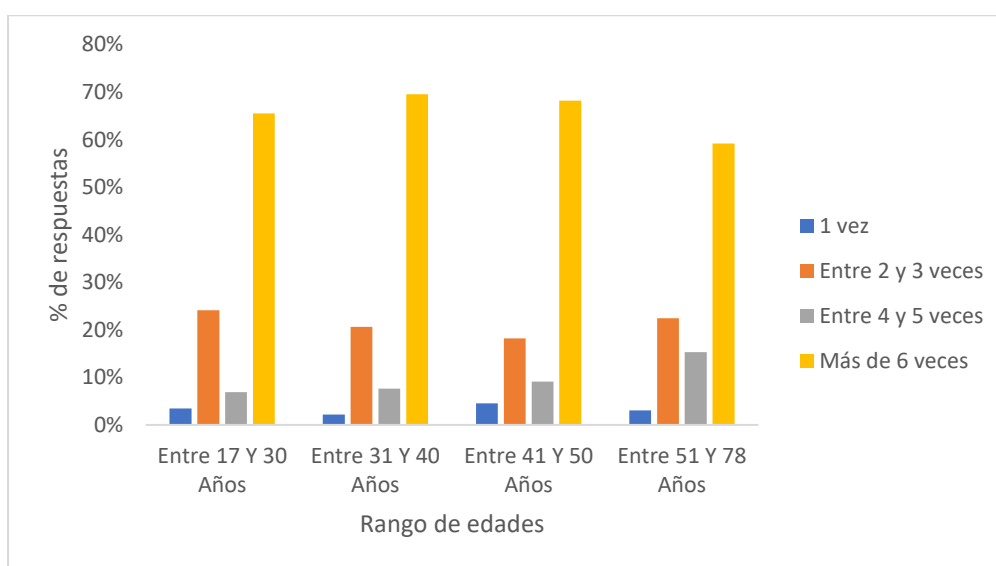
Una vez finalizado el análisis general por variable de la encuesta realizada, se inició el proceso de identificación de diferencias o similitudes en el comportamiento de la muestra en estudio, teniendo en cuenta factores como el género, rangos de edades, estrato socioeconómico, entre otras. A continuación, se presentan los resultados más representativos.

En primera medida se analizó la frecuencia de uso del vehículo particular en los desplazamientos de la muestra. De forma general el análisis permitió evidenciar que para los

encuestados existe una fuerte dependencia al vehículo particular, encontrando que alrededor del 60% de los participantes para los diferentes rangos de edad, usan el vehículo más de 6 veces a la semana. La *Figura 18* muestra la distribución del número de viajes por semana según el rango de edades en estudio.

### Figura 18

*Distribución de frecuencia de viajes semanales por edad.*



*Nota. Elaboración propia.*

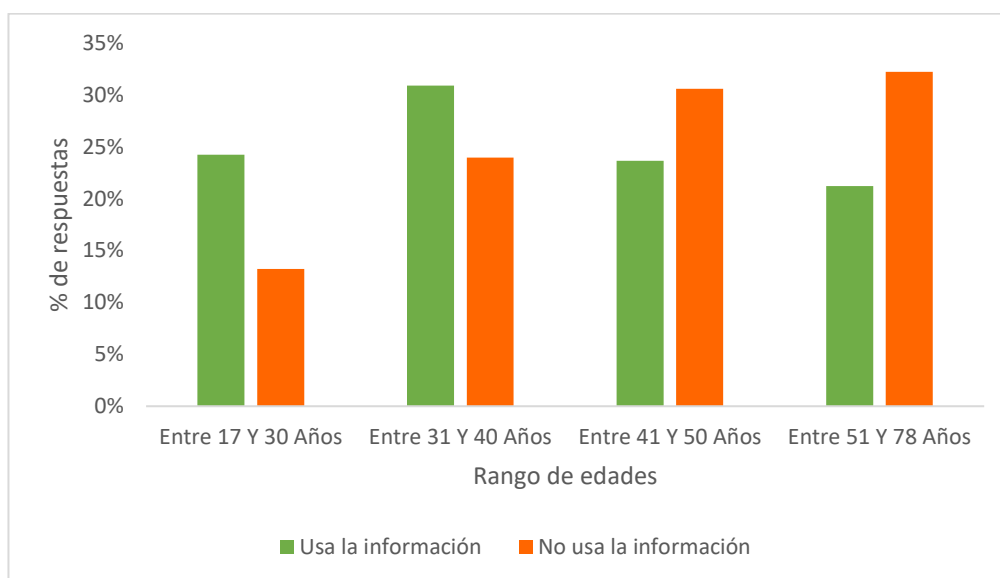
Un comportamiento similar se encontró para el caso de la distribución de las frecuencias de viaje por nivel socioeconómico. Si bien los estratos que tienen mayor participación en la encuesta son el 3 y el 4 con un 32% y 38% respectivamente, se encontró que en todos los estratos existe una frecuencia de viaje superior a 6 veces por semana para más del 50% de los encuestados. Para los estratos 3, 4, 5 y 6, se identificó una participación de entre 63 y 71%. Por otra parte, al analizar esta misma variable en relación con la escolaridad de los participantes, se encontró que la muestra estaba compuesta en un 70% por personas con formación a nivel de secundaria, pregrado

y posgrado, y que para cada una de estas categorías alrededor del 70% de los participantes se movilizaban más de 6 veces por semana.

Respecto a la decisión de usar la información suministrada, se identificó que a medida que aumenta la edad de los participantes, aumenta la inclinación de los participantes a no hacer uso de la información de ruta. Este comportamiento puede estar asociado a la dificultad para adaptarse al acelerado desarrollo de nuevas tecnologías, que es evidente entre generaciones. En la *Figura 19* puede verse como el comportamiento de los encuestados frente al uso de la información, disminuye su participación en la medida en que aumenta la edad de los conductores.

### Figura 19

*Comportamiento del uso de la información de ruta por rango de edades.*



*Nota. Elaboración propia.*

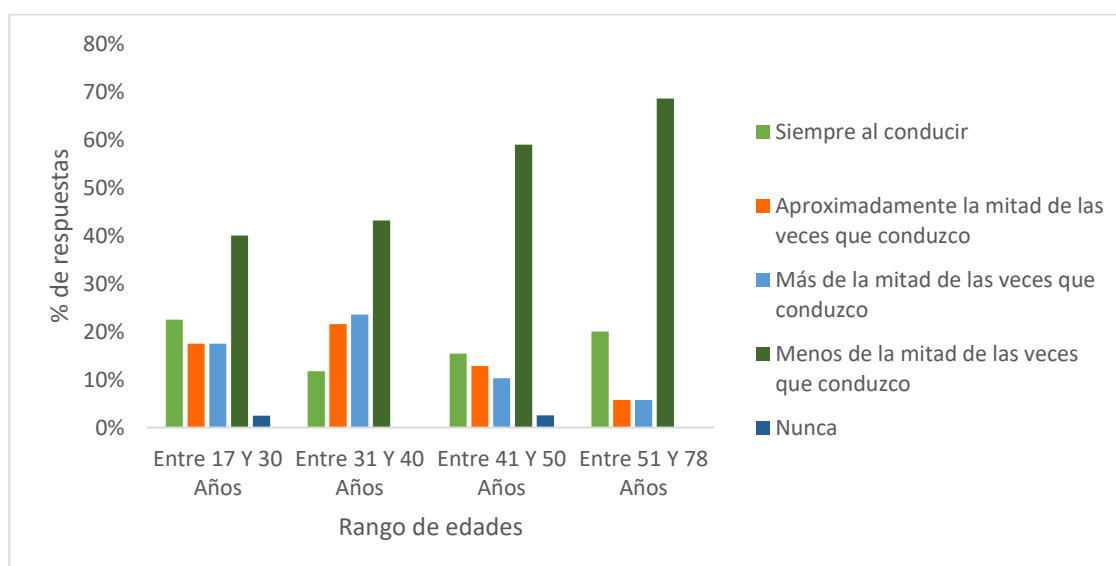
Además, se encontró que el uso de la información aumenta a medida que aumenta el nivel socioeconómico de los encuestados. El 40% de los encuestados de estrato 1 usan la información suministrada mientras que para los estratos 4 y 5 la participación es de un 64%. Sin embargo, se

encontró una variación del comportamiento del estrato 6, en donde solo el 47% de los encuestados hacen uso de la información.

Para conocer el comportamiento de los conductores respecto a la habitualidad de la consulta de información según su edad, en la *Figura 20* puede verse claramente que para los diferentes segmentos de edad la información es usada menos de la mitad de las veces que conduce y que la habitualidad en la consulta disminuye conforme aumenta la edad del encuestado. Este es un comportamiento que como se mencionó anteriormente puede estar relacionado a la dificultad de adaptación a las tecnologías que puede darse conforme aumenta la edad del conductor. Si se analiza la misma variable respecto al nivel socioeconómico y nivel académico, se evidencia que, para todos los casos, los conductores manifiestan usar la información menos de la mitad de las veces que consultan la información.

### Figura 20

*Habitualidad de consulta de información para efectuar los desplazamientos por rangos de edad.*



*Nota. Elaboración propia.*

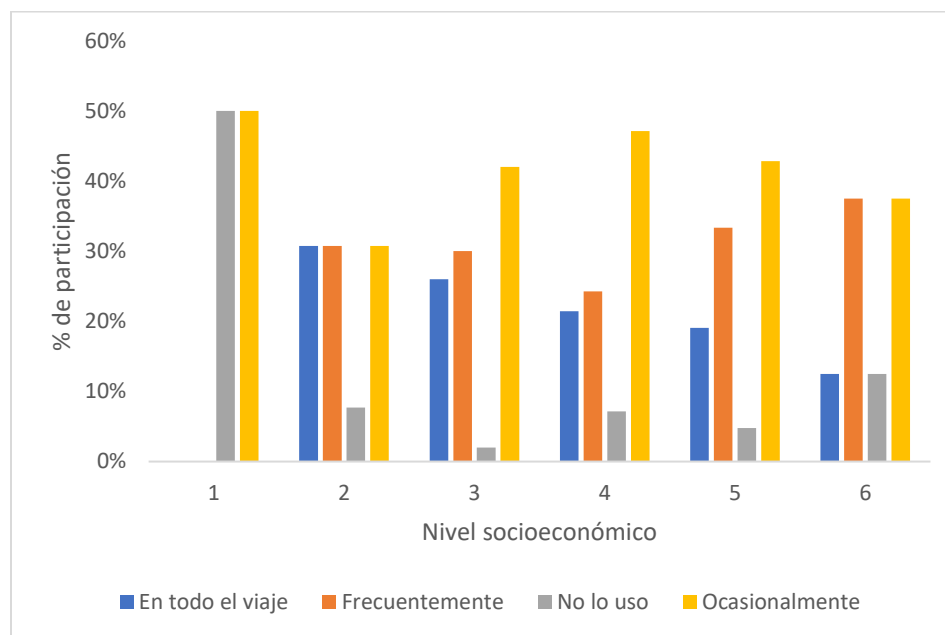
Cuando se indagó a los usuarios sobre el momento durante el viaje en que consultan la información de tráfico, se encontró que la mayoría de los conductores solo usan la información de forma ocasional, sin embargo, en el rango de edades entre 31 y 40 años, se encontró que la opción “frecuentemente” tiene una participación muy similar a la opción “ocasionalmente” con un 33%, lo cual indica que este subgrupo de la muestra tiende a usar con mayor frecuencia la información durante el viaje.

El análisis según el estrato socioeconómico indica de igual forma que el comportamiento de los diferentes estratos se inclina hacia un uso ocasional de la información en el viaje, sin embargo, se puede ver que para el estrato 2 se presenta preferencias similares en el uso de la información para las opciones “en todo el viaje”, “frecuentemente” y “ocasionalmente” con un 31% de participación en cada caso. Para el estrato 6 se encontró que el uso puede ser de ocasional a frecuente con un 38% de participación.

La *Figura 21*, muestra las preferencias de los usuarios relacionadas con el momento en que consultan la información según su estrato socioeconómico, se evidencia que existe una tendencia a aumentar las consultas de información de forma frecuente u ocasional, a medida que aumenta el estrato socioeconómico de la población. Sin embargo, en el caso del estrato 1, se evidencia que la consulta de información de tráfico se da solamente de forma ocasional o es inexistente. Este comportamiento puede estar asociado con la accesibilidad a los recursos que son necesarios para realizar las consultas.

**Figura 21**

*Momento durante el viaje en que se consulta la información de tráfico por nivel socioeconómico.*

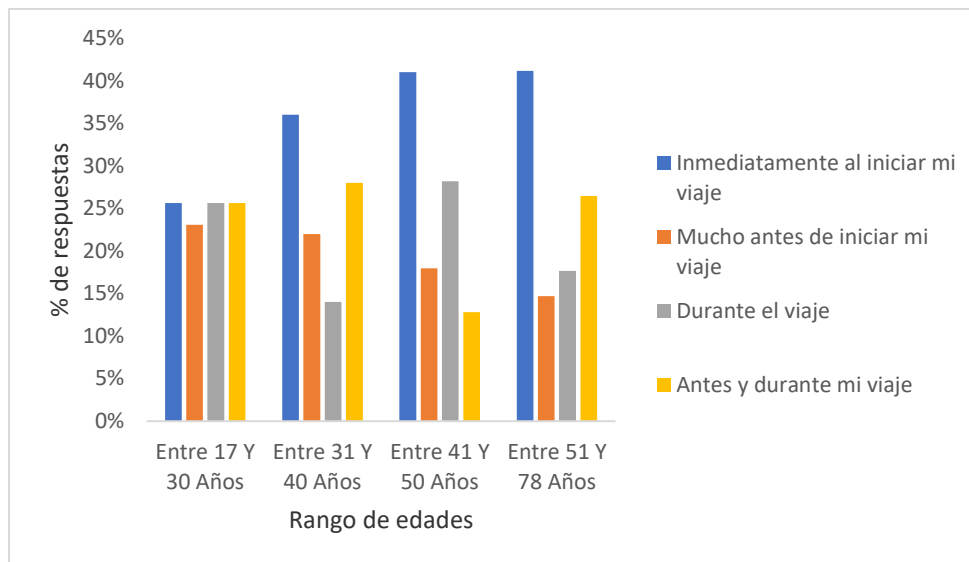


*Nota. Elaboración propia.*

Al consultar a los conductores sobre el momento en que realizan consultas sobre información de ruta, se encontró que, para la mayor cantidad de conductores sin importar su categoría de edad, la información es consultada inmediatamente al iniciar sus viajes. Sin embargo, para el rango comprendido entre los 17 y los 30 años, la consulta se realiza por igual con un 26% de participación para las opciones de “inmediatamente antes de iniciar el viaje”, “durante el viaje” y “antes y durante el viaje. La *Figura 22* muestra el comportamiento de esta variable por rangos de edades.

**Figura 22**

*Momento en que consulta la información de ruta por edades.*



*Nota. Elaboración propia.*

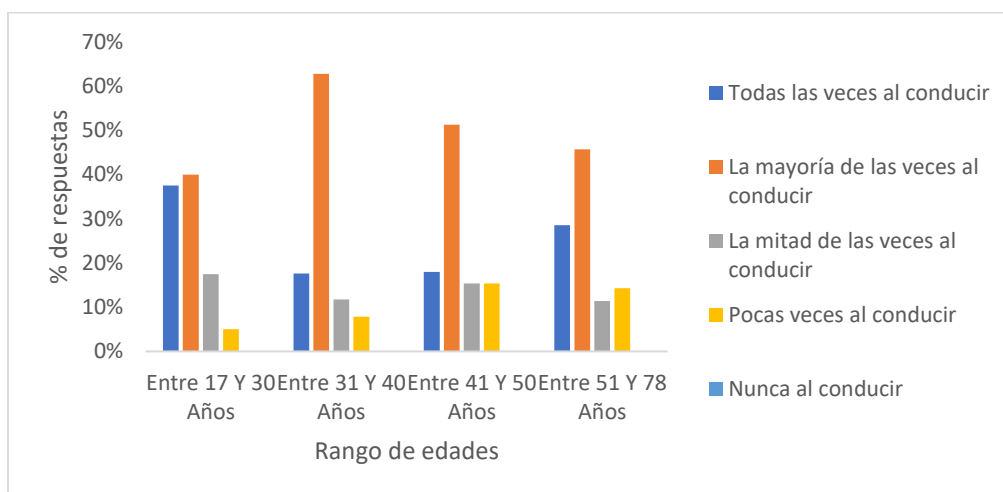
Al analizar esta misma variable desde el nivel socioeconómico, se encontró que la distribución es similar, ya que en todas las categorías prima la opción “inmediatamente antes de iniciar el viaje” con un 38% de contribución. Sin embargo, para el estrato 2 una mayoría del 38% de los encuestados señalaron que prefieren realizar la consulta mucho antes de iniciar el viaje, mientras que para los estratos 5 y 6 los encuestados muestran preferencias por las opciones de “inmediatamente antes de iniciar el viaje” y “antes y durante el viaje”, en donde cada una de ellas tiene una participación de un 38%, por encima de las demás opciones disponibles.

De la misma forma se indagó sobre la frecuencia en que se siguen las instrucciones dadas por el dispositivo que brinda la información de tráfico. Se encontró que para todas las edades es común que se sigan las instrucciones la mayoría de las veces al conducir, con porcentajes de selección superiores al 40% para cada rango de edad. Específicamente para el rango de edades comprendido entre los 17 y 30 años, se obtuvo un porcentaje de 38% para la opción de “todas las

veces al conducir”, porcentaje similar al encontrado para “la mayoría de las veces al conducir”, lo que nos permite concluir que en este rango de edades el uso de la información puede ser mayor. Este comportamiento puede asociarse a la facilidad que tiene este grupo de la población acceder y manejar estas tecnologías. La *Figura 23* muestra las respuestas obtenidas para cada uno de los rangos de edades.

### Figura 23

*Frecuencia de aceptación por rango de edades de las instrucciones dadas por los dispositivos que entregan información de ruta.*



*Nota. Elaboración propia.*

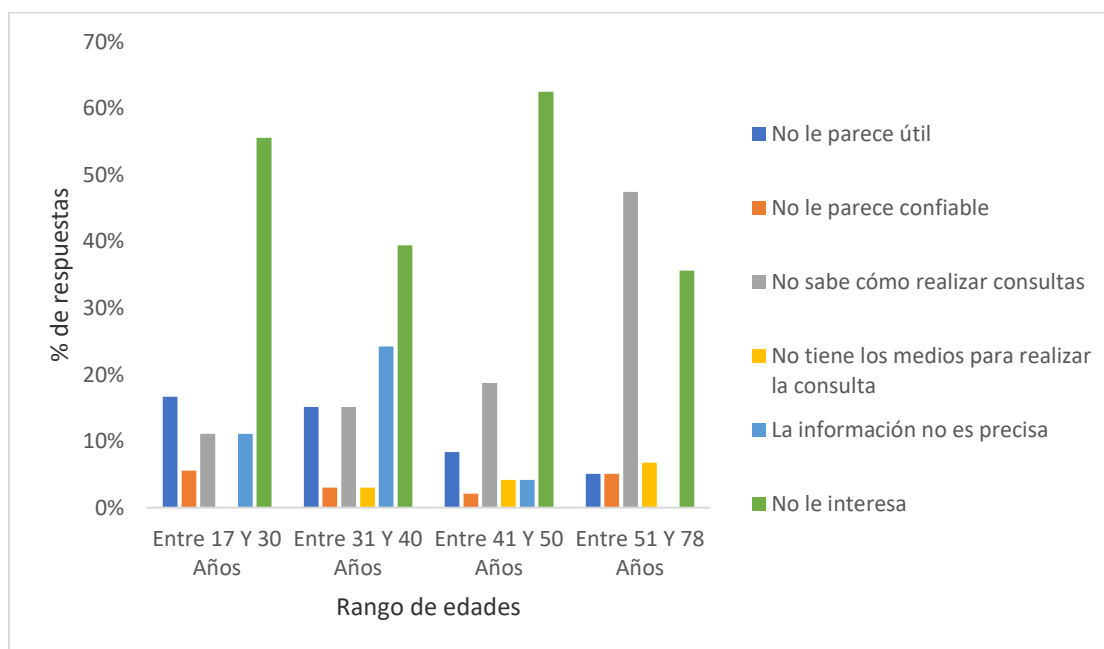
Al analizar este comportamiento desde las características del nivel socioeconómico y el nivel educativo de los encuestados, se encontró que para todos los casos el comportamiento de la población es similar, siendo la participación más representativa la asociada con la respuesta “la mayoría de las veces al conducir” con porcentajes superiores a 49% para la mayoría de los estratos socioeconómicos, seguido en importancia por la opción “todas las veces al conducir”. Para el caso del estrato 2 se presenta una participación de 23%, mientras que para la categoría de “todas las veces al conducir” presenta un porcentaje mayor de 38%.

Por último, se caracterizaron los encuestados que no hacen uso o no conocen las aplicaciones o dispositivos que brindan información de tráfico o rutas. A continuación, se presentan los resultados más relevantes.

Se consultó a los conductores sobre cuál es el motivo por el que no consultan información sobre rutas alternas para efectuar sus desplazamientos, se encontró que entre el 39% y el 63% de los encuestados de rangos de edad entre 17 y 50 años, no les interesa hacer uso de esta información. Para el rango de edades de entre 51 y 78 años, se encontró que un 47% de los encuestados no sabe cómo realizar las consultas, este hallazgo puede estar relacionado con la apropiación de la tecnología para personas en rangos de edad altos. En la *Figura 24*, puede verse el comportamiento de esta variable para los diferentes rangos de edades y las respuestas obtenidas.

**Figura 24**

*Motivo por el cual los conductores no consultan información sobre rutas alternas para efectuar sus desplazamientos, por edades.*

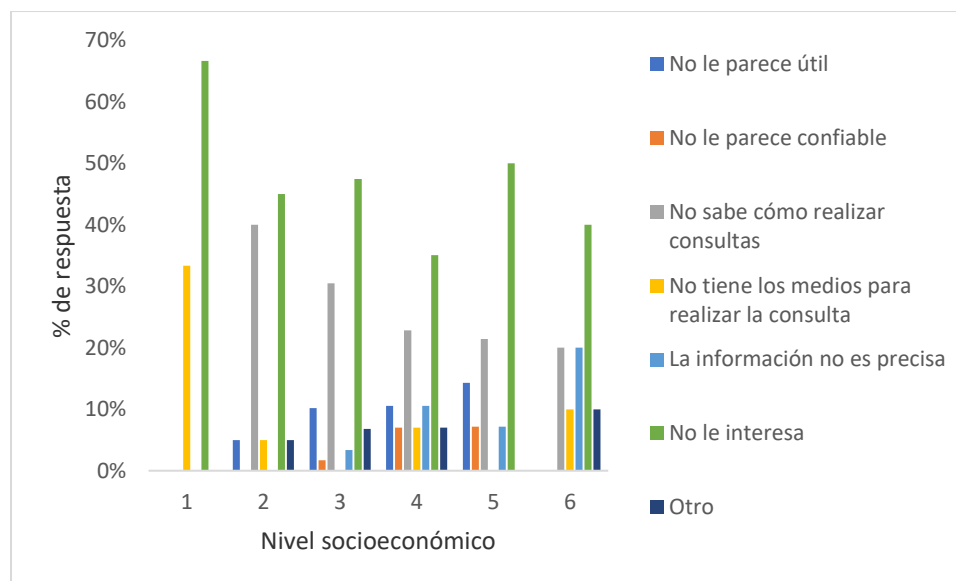


*Nota. Elaboración propia.*

Para el caso del análisis de la variable desde el estrato socioeconómico, se encontró que también es común para todos los estratos el no interés en la información con una participación entre 35% y 67% de los encuestados. Sin embargo, este análisis muestra una característica adicional muy interesante, la cual se relaciona con el comportamiento de la opción “no sabe cómo realizar consultas”, ya que esta opción decrece a medida que aumenta el nivel socioeconómico. A continuación, puede verse en detalle el comportamiento de esta variable.

**Figura 25**

*Motivo por el cual los conductores no consultan información sobre rutas alternas para efectuar sus desplazamientos, por nivel socioeconómico.*



*Nota. Elaboración propia.*

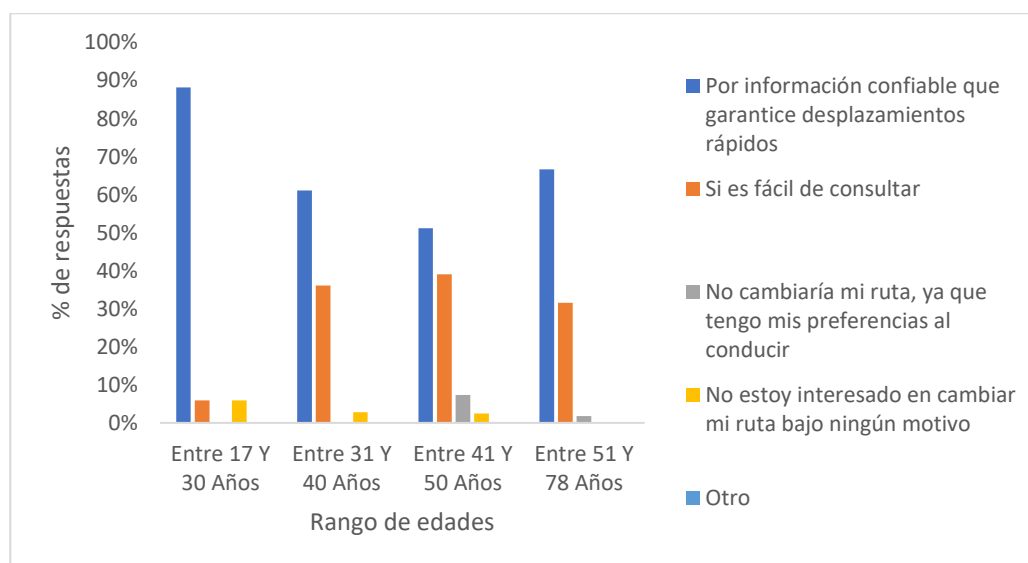
Para el caso del análisis de la variable desde el nivel de escolaridad, se evidenció un comportamiento similar en relación con el desinterés existente en realizar consultas con una participación de los encuestados de entre el 42% y el 60%. Sin embargo, un hallazgo interesante es que el 60% de las personas manifestaron no conocer la forma en que pueden realizar las

consultas. Para los encuestados con formación a nivel de secundaria, se encontró que al 42% no le interesa hacer consultas de la información y otro tanto igual desconoce cómo realizarlas.

Finalmente, se quiso indagar sobre razones por las cuales los conductores estarían dispuestos a modificar su ruta. Se encontró que entre el 61% y el 88% de los encuestados de diferentes edades, estarían dispuestos a modificar su ruta si cuentan con información confiable que garantice desplazamientos rápidos, encontrando un comportamiento significativamente alto en el rango de edades entre 17 y 30 años con un 88% de selección. Además, se encontró que muy pocos de los conductores encuestados no estarían dispuestos a cambiar su ruta en ninguna circunstancia. En la *Figura 26* puede verse el comportamiento de esta variable.

**Figura 26**

*Disposición a modificar su ruta por rangos de edades*



*Nota. Elaboración propia.*

Respecto al nivel socioeconómico y las preferencias sobre posibles razones por las cuales los conductores modificarían sus rutas, se encontró que es común para todos los estratos la

preferencia por la opción “por información confiable que garantice desplazamientos rápidos”, con una alta participación en todas las categorías de entre 55 y 67% de las respuestas obtenidas.

Los cálculos relacionados con la presentados en esta sección se encuentran con mayor detalle en el *Apéndice I*, el cual presenta una selección adicional con el análisis realizado a variables de interés en las que fue estudiado el comportamiento de las mismas con base en rangos de edad, nivel socioeconómico, nivel académico y género.

### 3.4.5. *Análisis bi-variado de la información*

Una vez finalizado el análisis de cada una de las variables en estudio de forma individual, se procedió a identificar aquellas variables que afectan de forma directa la tasa de aceptación de la información por parte del usuario, con el propósito de estudiar más a fondo su comportamiento definiendo la relación existente entre las variables y determinando si la distribución de las observaciones de una variable difiere dependiendo de las categorías establecidas para la segunda variable. (Minitab 18, 2021). La *Tabla 5* presenta las variables que serán objeto del análisis antes mencionado.

**Tabla 5**

*Listado de variables para procesamiento.*

| Pregunta   | Codificación de la Variable | Análisis Profundo | Método de análisis Uni-variado  | Método de análisis Bi-variado<br>Dependencia |
|--|-----------------------------|-------------------|---|--|
| <b>7. ¿Qué tan habitual consulta información sobre diferentes trayectos para efectuar sus desplazamientos?</b> | V9                          | SI                | Frecuencia absoluta, frecuencia relativa, rango intercuartílico y Mediana | Asociación por Chi-cuadrado                  |
| <b>8. ¿En qué momento durante su viaje, hace</b>   | V10                         | SI                | Moda y Frecuencia relativa.   | Asociación por Chi-cuadrado                  |

**uso de la información de ruta que consulta**

|   |     |    |   |                             |
|---|-----|----|---|-----------------------------|
| <b>9. Cuando consulta información, ¿Usted modifica o cambia su ruta?</b>  | V11 | SI | Frecuencia absoluta, frecuencia relativa, rango intercuartílico y Mediana | Asociación por Chi-cuadrado |
| <b>9.1. De las siguientes razones, indique porque modifica su ruta</b>  | V12 | NO | Moda y Frecuencia relativa.   | Asociación por Chi-cuadrado |
| <b>10. ¿Por lo general en qué momento realiza consultas sobre información de ruta?</b>  | V13 | SI | Moda y Frecuencia relativa.   | Asociación por Chi-cuadrado |
| <b>11. La información que recibe en relación con las rutas disponibles para efectuar sus desplazamientos, ¿es útil para reducir sus tiempos de viaje?</b> | V14 | SI | Frecuencia absoluta, frecuencia relativa y Mediana                        | Asociación por Chi-cuadrado |
| <b>12. Que tan frecuentemente sigue las instrucciones brindadas por el dispositivo que le da la información sobre rutas disponibles</b>                   | V15 | SI | Frecuencia absoluta, frecuencia relativa y Mediana                        | Asociación por Chi-cuadrado |
| <b>13. ¿Qué tan confiable es la información que consulta sobre rutas disponibles para cubrir sus desplazamientos?</b>                                     | V16 | SI | Frecuencia absoluta, frecuencia relativa y Mediana                        | Asociación por Chi-cuadrado |
| <b>14. ¿Paga por la información de tráfico que consulta?</b>  | V17 | NO | Moda y Frecuencia relativa.   | N/A                         |
| <b>15. ¿Cuál es el motivo por el cual NO consulta información sobre rutas alternas para efectuar sus desplazamientos?</b>                                 | V18 | NO | Frecuencia absoluta, frecuencia relativa y Mediana                        | N/A                         |
| <b>16. ¿Usted modificaría su ruta si recibe información confiable y útil?</b>   | V19 | SI | Moda y Frecuencia relativa.   | N/A                         |

|  |     |    |  |     |
|--|-----|----|--|-----|
| <b>16.1. Por cuales de las siguientes razones modificaría su ruta.</b> | V20 | NO | Frecuencia absoluta, frecuencia relativa y Mediana | N/A |
|--|-----|----|--|-----|

*Nota. Elaboración propia.*

a) Test de asociación Chi-cuadrado

El análisis realizado consistió en aplicar la prueba chi-cuadrado para asociación en parejas de variables con el objetivo de determinar si existe una relación entre las variables. Para identificar variables que tuvieran distribuciones similares, se analizó la influencia de cada variable sobre las demás y se aplicó la prueba a cada pareja. El *Apéndice J* presenta los resultados obtenidos para las parejas de variables y a continuación se presentan los resultados destacados.

Se identificaron 3 variables que se consideran pueden explicar en mayor medida la tasa de aceptación de la información de tráfico por parte de los encuestados, las variables V9 habitualidad de la consulta, V11 intención de modificar la ruta Y V15 frecuencia de aceptación de la información. Se propuso entender el comportamiento de estas variables por medio del análisis de las distribuciones respecto a las demás variables en estudio. A continuación, la *Tabla 6*, presenta las parejas de variables analizadas.

**Tabla 6**

*Análisis de distribución bi-variado.*

| Variable A |                          | Variable B |  |
|------------|--------------------------|------------|--|
| V9         | Habitualidad de consulta | V16        | Confiabilidad de la información            |
| V9         | Habitualidad de consulta | V11        | Intención de modificar la ruta             |
| V9         | Habitualidad de consulta | V15        | Frecuencia de aceptación de la información |
| V9         | Habitualidad de consulta | V14        | Utilidad de la información                 |

|     |  |     |  |
|-----|--|-----|--|
| V11 | Intensión de modificar la ruta             | V10 | Momento de uso de la información           |
| V11 | Intensión de modificar la ruta             | V16 | Confiabilidad de la información            |
| V11 | Intensión de modificar la ruta             | V15 | Frecuencia de aceptación de la información |
| V11 | Intensión de modificar la ruta             | V14 | Utilidad de la información                 |
| V15 | Frecuencia de aceptación de la información | V10 | Momento de uso de la información           |
| V15 | Frecuencia de aceptación de la información | V13 | Momento de consulta de la información      |
| V15 | Frecuencia de aceptación de la información | V16 | Confiabilidad de la información            |
| V15 | Frecuencia de aceptación de la información | V14 | Utilidad de la información                 |
| V10 | Momento de uso de la información           | V13 | Momento de consulta de la información      |
| V14 | Utilidad de la información                 | V16 | confiabilidad de la información            |

---

*Nota. Elaboración propia.*

A continuación, se presenta el paso a paso ejecutado para determinar si las distribuciones de las variables difieren o existe alguna asociación entre ellas. El proceso se realizó con las variables V9 intención de modificar la ruta y V16 confiabilidad de la información. En primera medida se construyó la tabla de contingencia mostrada en la *Tabla 7*, en donde se muestran las observaciones de las dos variables de interés.

**Tabla 7**

*Tabla de contingencia variables V9 y V16.*

| Habitualidad de la consulta                        | Confiabilidad |                 |                             | Total general |
|--|---------------|-----------------|-----------------------------|---------------|
|  | Es confiable  | No es confiable | Ocasionalmente es confiable |               |
| Aproximadamente la mitad de las veces que conduzco | 16            | 0               | 9                           | 25            |
| Más de la mitad de las veces que conduzco          | 15            | 0               | 10                          | 25            |
| Menos de la mitad de las veces que conduzco        | 61            | 1               | 23                          | 85            |
| Nunca  | 1             | 0               | 1                           | 2             |
| Siempre al conducir                                | 22            | 0               | 6                           | 28            |
| Total general                                      | 115           | 1               | 49                          | 165           |

*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en el caso de la categoría “no es confiable” las frecuencias observadas son en su mayoría menores o iguales a 1, por lo cual no se incluirá esta categoría en el análisis ya que el método recomienda combinar u omitir categorías cuyas frecuencias esperadas sean demasiado pequeñas, ya que podría afectar el cálculo del valor p de la prueba. (Minitab 18, 2021) Una vez se obtuvo la tabla de contingencia se plantearon las hipótesis a probar en el análisis. Se definió  $H_0$  como: las variables son independientes y no existe ninguna asociación entre ellas, y como  $H_1$ : las variables son dependientes por lo cual existe una asociación entre ellas.

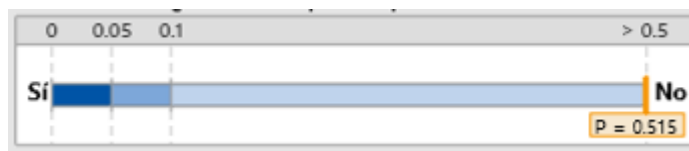
Habiendo aplicado la prueba de chi-cuadrado para asociación para las variables V9 Y V16, se encontró que las diferencias entre los perfiles de resultados no son significativas con un valor  $p=0,515$ , por lo cual no hay suficiente evidencia para concluir que existen diferencias entre los perfiles porcentuales de los resultados con un nivel de significancia de 0,05, es decir, no es posible

concluir que existe una asociación entre las variables. En la *Tabla 8* se presentan los resultados obtenidos en la aplicación de la prueba.

**Tabla 8**

*Diferencias entre los perfiles porcentuales de las variables V9 y V16.*

| Observado /<br>Esperado | La mitad<br>de las<br>veces |     | Más de la<br>mitad de<br>las veces |     | Menos de<br>la mitad de<br>las veces |     | Nunca |       | Siempre |     |
|-------------------------|-----------------------------|-----|------------------------------------|-----|--------------------------------------|-----|-------|-------|---------|-----|
|                         | Obs                         | Esp | Obs                                | Esp | Obs                                  | Esp | Obs   | Esp   | Obs     | Esp |
| <b>Confiable</b>        | 16                          | 18  | 15                                 | 18  | 61                                   | 59  | 1     | 1.4   | 22      | 20  |
| <b>Ocasionalmente</b>   | 9                           | 7.5 | 10                                 | 7.5 | 23                                   | 25  | 1     | 0.60* | 6       | 8.4 |
| <b>Total</b>            | 25                          |     | 25                                 |     | 84                                   |     | 2     |       | 28      |     |



*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

El análisis realizado para las variables V14 utilidad de la información y V16 confiabilidad de la información, obtuvo como resultado la *Tabla 9* de contingencia para la cual fue necesario excluir la categoría “No es útil” para continuar con el análisis. Los resultados obtenidos de la aplicación de la prueba se pueden ver en la *Tabla 10*, los cuales indican que las diferencias obtenidas entre los perfiles de resultados porcentuales son significativas para un valor  $p=0.007$ , por lo cual es posible concluir que existen diferencias significativas entre los perfiles porcentuales de resultado en el nivel de significancia de 0.05, es decir, existe asociación entre las variables V14 y V16.

**Tabla 9**

*Tabla de contingencia variables V14 y V16*

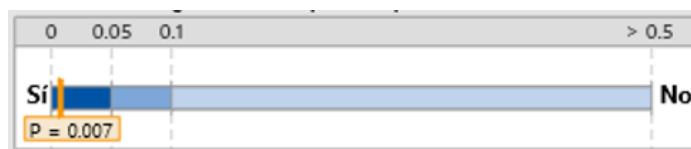
| Categoría                   | Utilidad |                        |            | Total general |
|-----------------------------|----------|------------------------|------------|---------------|
|                             | Es útil  | Ocasionalmente es útil | No es útil |               |
| Es confiable                | 96       | 19                     | 0          | 115           |
| No es confiable             | 0        | 1                      | 0          | 1             |
| Ocasionalmente es confiable | 32       | 17                     | 0          | 49            |
| Total general               | 128      | 37                     | 0          | 165           |

*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 10**

*Diferencias entre los perfiles porcentuales de las variables V14 y V16.*

| Observado / Esperado  | Es confiable |     | No es confiable |       | Ocasionalmente |     |
|-----------------------|--------------|-----|-----------------|-------|----------------|-----|
|                       | Obs          | Esp | Obs             | Esp   | Obs            | Esp |
| <b>Es útil</b>        | 96           | 89  | 0               | 0.78* | 32             | 38  |
| <b>Ocasionalmente</b> | 19           | 26  | 1               | 0.22* | 17             | 11  |
| <b>No es útil</b>     | 0            | 0*  | 0               | 0*    | 0              | 0*  |
| <b>Total</b>          | 115          |     | 1               |       | 49             |     |



*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la *Tabla 11* se presenta los resultados obtenidos en el análisis de las variables de interés para el estudio.

**Tabla 11**

*Resultados del análisis de asociación por Chi cuadrado de las variables de interés.*

| <b>Variable A</b> | <b>Variable B</b> | <b>P valor</b> | <b>Nivel de significancia</b> | <b>Valor Observado / Valor esperado</b> | <b>Conclusión</b>   |
|-------------------|-------------------|----------------|-------------------------------|---|---|
| <b>V9</b>         | V16               | 0.41           | 0.05                          | No existen variaciones significativas   | No hay suficiente evidencia que indique que existen diferencias entre los perfiles, por lo cual no es posible concluir que existe una asociación entre las variables. |
| <b>V9</b>         | V11               | 0.005          | 0.05                          | Existen variaciones significativas      | Las diferencias obtenidas entre los perfiles son significativas, por lo cual es posible concluir que existe una asociación entre las variables                        |
| <b>V9</b>         | V15               | 0.001          | 0.05                          | Existen variaciones significativas      | Las diferencias obtenidas entre los perfiles son significativas, por lo cual es posible concluir que existe una asociación entre las variables                        |
| <b>V9</b>         | V14               | 0.218          | 0.05                          | No existen variaciones significativas   | No hay suficiente evidencia que indique que existen diferencias entre los perfiles, por lo cual no es posible concluir que existe una asociación entre las variables. |
| <b>V11</b>        | V10               | 0.013          | 0.05                          | Existen variaciones significativas      | Las diferencias obtenidas entre los perfiles son significativas, por lo cual es posible concluir que  |

|            |     |       |      |                                       |   |
|------------|-----|-------|------|---------------------------------------|---|
|            |     |       |      |                                       | existe una asociación entre las variables   |
| <b>V11</b> | V16 | 0.381 | 0.05 | No existen variaciones significativas | No hay suficiente evidencia que indique que existen diferencias entre los perfiles, por lo cual no es posible concluir que existe una asociación entre las variables. |
| <b>V11</b> | V15 | 0.331 | 0.05 | No existen variaciones significativas | No hay suficiente evidencia que indique que existen diferencias entre los perfiles, por lo cual no es posible concluir que existe una asociación entre las variables. |
| <b>V11</b> | V14 | 0.011 | 0.05 | Existen variaciones significativas    | Las diferencias obtenidas entre los perfiles son significativas, por lo cual es posible concluir que existe una asociación entre las variables                        |
| <b>V15</b> | V10 | 0.001 | 0.05 | Existen variaciones significativas    | Las diferencias obtenidas entre los perfiles son significativas, por lo cual es posible concluir que existe una asociación entre las variables                        |
| <b>V15</b> | V13 | 0.213 | 0.05 | No existen variaciones significativas | No hay suficiente evidencia que indique que existen diferencias entre los perfiles, por lo cual no es posible concluir que existe una asociación entre las variables. |

|            |     |       |      |                                       |   |
|------------|-----|-------|------|---------------------------------------|---|
| <b>V15</b> | V16 | 0.576 | 0.05 | No existen variaciones significativas | No hay suficiente evidencia que indique que existen diferencias entre los perfiles, por lo cual no es posible concluir que existe una asociación entre las variables. |
| <b>V15</b> | V14 | 0.169 | 0.05 | No existen variaciones significativas | No hay suficiente evidencia que indique que existen diferencias entre los perfiles, por lo cual no es posible concluir que existe una asociación entre las variables. |
| <b>V10</b> | V13 | 0.032 | 0.05 | Existen variaciones significativas    | Las diferencias obtenidas entre los perfiles son significativas, por lo cual es posible concluir que existe una asociación entre las variables                        |
| <b>V14</b> | V16 | 0.007 | 0.05 | Existen variaciones significativas    | Las diferencias obtenidas entre los perfiles son significativas, por lo cual es posible concluir que existe una asociación entre las variables                        |

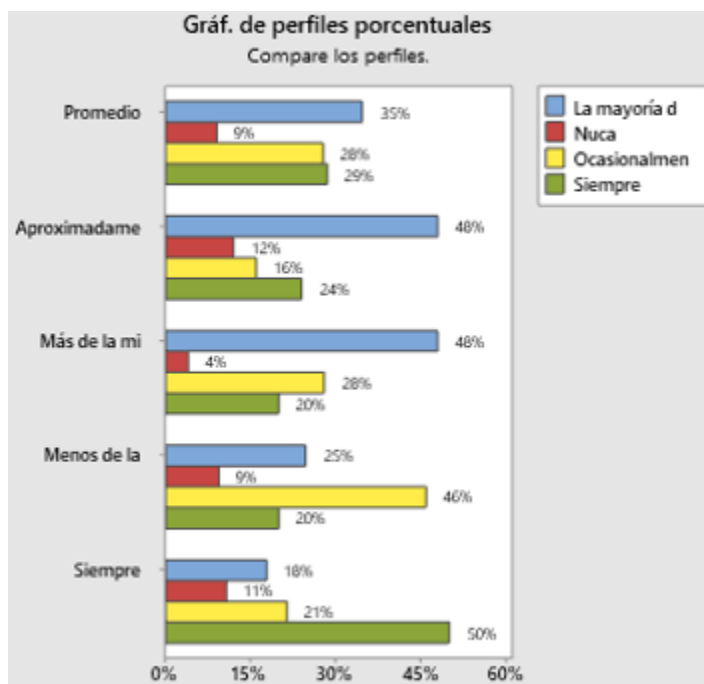
---

*Nota. Elaboración propia.*

El análisis realizado permitió identificar la relación entre las variables estudiadas, encontrando que algunas de ellas están asociadas. Un ejemplo son las variables V9 habitualidad de la consulta y V11 intensidad de modificar la ruta, la asociación entre estas variables indica que los conductores tienen la intención de modificar su ruta, la mayoría de las veces que consultan la información. En la *Figura 27* puede verse el gráfico de perfiles porcentuales el cual muestra la relación entre las respuestas de las dos variables.

**Figura 27**

*Relación entre las respuestas de las variables V9 y V11.*



*Nota. Elaboración propia con base en el software Minitab18.*

Como puede verse en la figura anterior, para las categorías de la variable de habitualidad de consulta en promedio el 64% de los encuestados contestaron que modificaban su ruta siempre y la mayoría de las veces y solo un 9% contestó que no modifica su ruta. Los conductores que manifestaron consultar la información siempre al conducir, un 50% indicó que siempre modifica la ruta y quienes señalaron que consultan la información más de la mitad de las veces, el 20% señaló que siempre realiza modificaciones en su recorrido y un 48% modifica su ruta la mayoría de las veces.

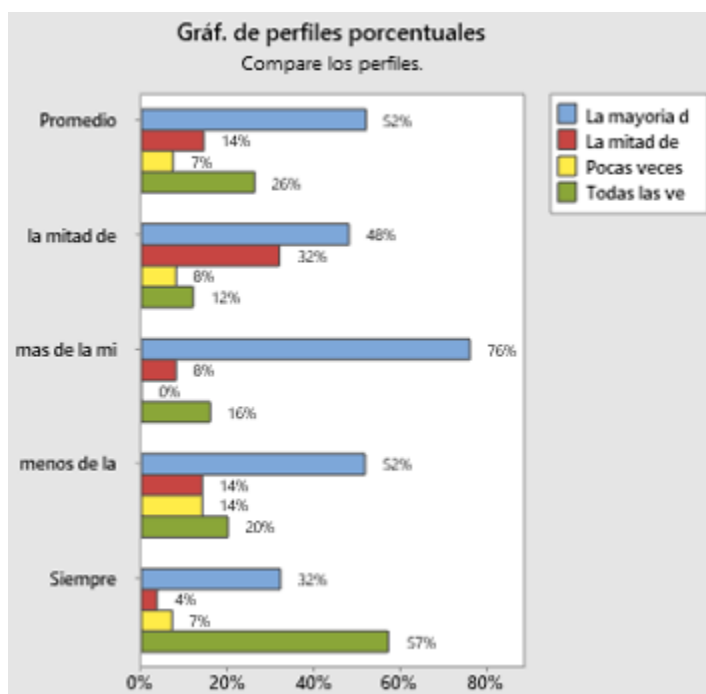
Al analizar la variable V9 y V15 frecuencia de aceptación de la información, se encuentra que dichas variables también se encuentran asociadas, lo que nos permite concluir que la frecuencia de seguimiento de las instrucciones por parte de los conductores está muy relacionada

con la habitualidad de la consulta de la información. En la *Figura 28* puede verse que en promedio un 78% de los encuestados manifestaron que siempre y la mayoría de las veces siguen las instrucciones que les permiten modificar sus rutas cuando consultan información de tráfico y que el 9% de los encuestados nunca sigue las instrucciones a pesar de que consulta la información.

Por otra parte, al analizar el comportamiento individual de las respuestas obtenidas para la variable de habitualidad de la consulta, se encontró que el 50% de quienes siempre consultan información sobre diferentes trayectos para efectuar sus desplazamientos, sigue las instrucciones brindadas todas las veces, y para quienes consultan más de la mitad de las veces la información, se encontró que el 20% siguen las instrucciones siempre y el 48% las siguen la mayoría de las veces.

## Figura 28

*Relación entre las respuestas de las variables V9 y V15.*



*Nota. Elaboración propia con base en el software Minitab18.*

Como puede verse la relación entre las variables V9, V11 y V15, describen el comportamiento de los conductores ante la consulta de información de tráfico, el interés en modificar la ruta seleccionada para efectuar sus desplazamientos y la frecuencia es que sigue las instrucciones para cambiar su ruta

Del análisis realizado de la variable V9 respecto a las variables V11 y V15, se obtuvo como resultado que para más del 60% de los encuestados para ambas variables, los participantes señalaron tener interés en modificar su ruta y en aceptar la información siempre o la mayoría de las veces, respecto a las respuestas obtenidas ante la habitualidad de la consulta. Si consideramos además los resultados obtenidos la variable V12 motivo de modificación de la ruta, se podría concluir que este comportamiento está motivado por el interés de encontrar mejores opciones de recorrido cuando hay tráfico en la ciudad (68.6%) y por la posibilidad de que exista un evento de accidente por lo cual pueden requerir una nueva ruta para sus recorridos (57.7%)

Al estudiar la asociación de la variable V9 respecto a las variables V14 utilidad de la información y V16 confiabilidad de la información, se encontró que no hay evidencia significativa que permita concluir que dichas variables están relacionadas. Este comportamiento puede estar relacionado con la percepción de utilidad y confiabilidad de los encuestados frente a la información específica en estudio, ya que la información puede ser consultada por diferentes motivos.

Por otro lado, al analizar las variables V11 y V15 se encontró que no existe suficiente evidencia que indique que existe una posible relación entre las variables, es decir que la intención de modificar la ruta por parte de los encuestados, no indica necesariamente que modifiquen la opción de recorrido seleccionada por el conductor. Este comportamiento puede deberse a las condiciones de tráfico de la ciudad y/o a la condición de las rutas alternas sugeridas. Es posible que, si la ciudad presenta altos índices de congestión, las vías alternas para efectuar los

desplazamientos no representen una mejora significativa, es decir que es posible que no se ofrezca opciones óptimas para el usuario que lo motiven a cambiar su recorrido, o que simplemente el usuario acepte las demoras informadas para continuar con el recorrido habitual.

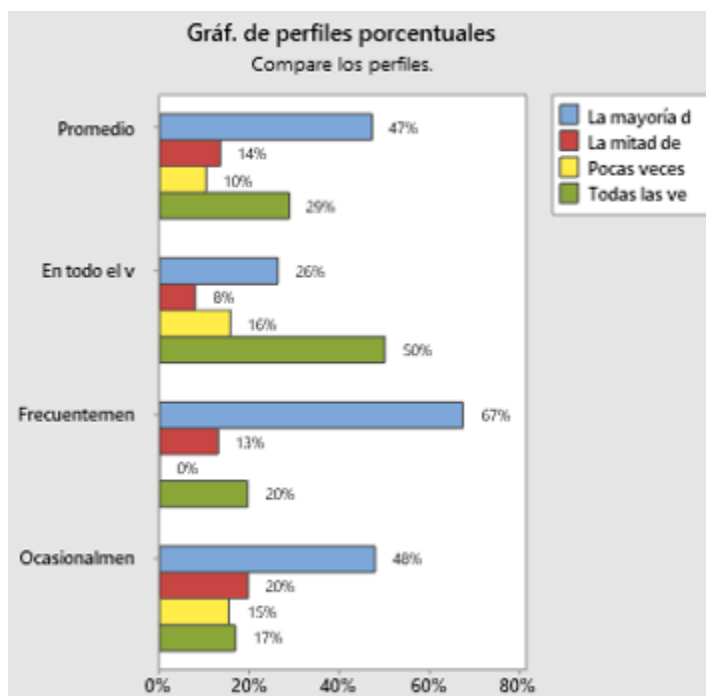
Al analizar el comportamiento de la variable V11 con la variable V14, se encontró que existe una relación entre las variables, es decir que es posible que la intención de modificar la ruta por parte de los conductores dependa de la percepción de la utilidad de la información. Este comportamiento puede indicar que si bien la utilidad no es una variable que influya en la habitualidad de la consulta de información por parte de los encuestados, si es relevante para tomar decisiones relacionadas con el cambio de ruta. Por tal motivo la percepción de utilidad de la información influye directamente en la intención del conductor de modificar su recorrido.

Al analizar ahora si existe una relación entre las variables V11 y V16, se encontró que no existe evidencia que indique las variables estén relacionadas, por lo cual puede concluirse que la intención de modificar la ruta por parte de los conductores, no se relaciona con la percepción de confiabilidad que tienen de la información suministrada. Esto puede indicar que la motivación de los conductores para modificar su ruta se relaciona más con la conveniencia de las rutas ofrecidas, que por una evaluación por parte del conductor de si la información que le presenta es real o no.

Para las variables V15 y V 10 momento de uso de la información, se encontró que las variables están asociadas, es decir que la frecuencia en la aceptación por parte de los encuestados está relacionada con el momento en que se realiza la consulta. En la *Figura 29* puede verse que el 50% de los conductores que usan la información en todo el viaje, aceptan la información siempre que la consultan, y un 26% de los conductores la aceptan la mayoría de las veces que la consultan. El 67% de los conductores que hacen uso frecuente de la información que consultan, aceptan la información la mayoría de las veces y un 20% más la acepta todas las veces que conduce.

**Figura 29**

*Relación entre las respuestas de las variables V15 y V10*



*Nota. Elaboración propia con base en el software Minitab18.*

Finalmente, al estudiar la relación existente entre la variable V15 y las variables V14 y V16, se encontró que no existe suficiente evidencia que permita concluir que existe una asociación entre las variables, es decir que la frecuencia de aceptación de la información por parte de los usuarios no depende de su percepción de utilidad o de la confianza que tengan en la información.

b) Análisis de correlación.

Se planteó realizar un análisis de correlación para las variables con el objetivo de medir si existe un comportamiento que señale que una variable cambia con relación al cambio de otra. Se realizó un ejercicio inicial en el cual se calculó la matriz de correlación entre las variables ordinales V9, V11, V14 Y V16, sin embargo, al obtener los resultados fue claro que el análisis no era adecuado para la información en estudio. Se encontró que el comportamiento de los datos no es

lineal o monótono por lo cual los datos obtenidos no reflejaban las proporciones reales de la asociación entre las variables en estudio. Adicionalmente al trabajar con datos categóricos, existían valores que podían comportarse como valores atípicos en el análisis, lo cual se reflejaba fuertemente y de manera negativa en los resultados obtenidos. Por lo anterior, el análisis de correlación no se consideró como parte del desarrollo del estudio.

#### ***3.4.6. Definición de las tasas de aceptación de información de tráfico por parte de los conductores del área metropolitana de Bucaramanga.***

A continuación, se presentan los escenarios propuestos para definir las tasas de aceptación de la información de tráfico por parte de los conductores del área metropolitana de Bucaramanga, los cuales se soportan en el análisis presentado anteriormente. Cada escenario definirá un porcentaje de aceptación de forma que se construirán varias alternativas de acuerdo con el comportamiento evidenciado por los conductores encuestados.

- Escenario 0 (base) - Tasa de aceptación de la información de tráfico: 0%

En primera medida se plantea un escenario base, el cual busca representar la situación actual de la movilidad, sin considerar los posibles efectos que podría tener el acceso de los conductores a información sobre el estado de tráfico. Este escenario contempla el estado “típico” de área metropolitana estableciendo un punto de partida para el análisis que permite posteriormente realizar comparaciones e identificar si existen cambios cuando se acepta la información por parte de los conductores. El escenario considera la actualización de los flujos y la red vial para el año 2019.

- Escenario 100 (referencia) - Tasa de aceptación de la información de tráfico: 100%

Este escenario se propone con la intención de conocer cómo se comportaría la movilidad en la ciudad si todos los conductores aceptarían la información de tráfico y siguieran las

instrucciones para efectuar sus desplazamientos. Se plantea con el fin de obtener un escenario de referencia que permita realizar comparación y evaluar la efectividad de los escenarios propuestos.

- Escenario 1 (medio) - Tasa de aceptación de la información de tráfico: 50%

Este escenario coincide con el primer acercamiento realizado con los encuestados, cuyo objetivo fue separar la muestra en estudio en conductores con conocimiento de las aplicaciones pero considerando a la vez que hagan uso de la información disponible para sus consultas, lo cual corresponde al 49.7% es decir aproximadamente la mitad de la población estaría dispuesta a hacer uso de esta información y modificar sus recorridos de acuerdo a lo informado por las diferentes plataformas o dispositivos.

Con el propósito de tener mayor claridad sobre lo antes expuesto, remítase a la *Figura 11*, en ella podrá encontrar el diagrama de flujo que muestra los porcentajes de respuesta obtenido en la ejecución de la encuesta y señala los subgrupos identificados. En el presente escenario se considera la totalidad de los encuestados que pertenecen al subgrupo que conocen y hacen uso de la información

- Escenario 2 (optimista) - Tasa de aceptación de la información de tráfico: 87%

Este escenario presenta una modificación del escenario anterior, considerando además un porcentaje de los encuestados que hace parte del otro subgrupo identificado al cual pertenecen las personas que no conocen la información o no hacen uso de ella. De acuerdo con lo señalado por los participantes en la pregunta No 16 en la que se les consultó a los encuestados si modificarían su ruta si reciben información confiable y útil, un 37% de los encuestados manifestó que si lo harían.

A raíz de esta respuesta, se consideró un escenario “optimista” el cual considerara además de la subpoblación que conoce y usa la información, a quienes no la conocen ni la usan, pero están

interesados en usar la información de tráfico bajo condiciones de percepción de utilidad y confiabilidad de esta.

- Escenario 3 (Realista 1) - Tasa de aceptación de la información de tráfico: 29%

Este escenario se propone desde el escenario medio, el cual se ajusta a las respuestas obtenidas en las preguntas posteriores y que permitieron identificar diferentes características del comportamiento de los conductores. Este escenario considera a quienes conocen y usan la información, y que además de acuerdo con lo registrado en la pregunta No 9, modifican o cambian su ruta siempre o la mayoría de las veces.

Este escenario busca considerar solamente los usuarios que se sabe modifican su ruta al recibir la información de tráfico, y que además lo hacen de forma frecuente, ya que de esta forma podríamos tener un acercamiento efectivo al comportamiento de los flujos de la ciudad cuando hay conductores que guían sus decisiones de ruta considerando el estado del tráfico.

- Escenario 4 (Realista 2) - Tasa de aceptación de la información de tráfico: 19%

Este escenario se propone con el fin de hacer un análisis más profundo al escenario 3, considerando la percepción de confiabilidad de los encuestados, en sus decisiones de aceptación de la información. Es decir, se busca representar a la población que conoce y usa la información de tráfico, modificando las rutas seleccionadas para sus recorridos siempre y la mayoría de las veces que conduce, y que a la vez opina que la información suministrada es confiable.

- Escenario 5 (Realista 3) - Tasa de aceptación de la información de tráfico: 37%

Este escenario se propone con el fin de ajustar la tasa de aceptación por medio de la variable V15 (Frecuencia de aceptación de la información) la cual brinda información directa sobre los conductores que modifican sus desplazamientos cuando reciben la información sobre el estado de tráfico de la ciudad. Se consideró a los conductores que manifestaron conocer y consultar la

información de tráfico y que además modifican sus desplazamientos todas y la mayoría de las veces según el análisis realizado.

La variable 15 describe la tasa de aceptación de la información por parte del conductor, ya que, considerando las respuestas obtenidas por parte de los encuestados, se puede tener certeza de quienes realmente siguen las instrucciones y modifican sus desplazamientos, por lo cual es posible identificar que esta población redistribuye los flujos de la ciudad de acuerdo con la información suministrada. Sin embargo, esta variable no tiene relación con la percepción de utilidad o confiabilidad, por lo cual es inherente a factores externos que puedan afectar la aceptación de la información.

Consideraciones de los escenarios propuestos:

Los escenarios propuestos se basaron en el comportamiento de la muestra que se describió detalladamente en los *Capítulos 8.4.3, 8.4.5, y 8.4.6*, para los cuales se señaló los motivos de consulta de la información momento de consulta, el porqué de la consulta, relación entre las diferentes variables, y demás hallazgos descritos que soportan los escenarios propuestos.

Se consideraron para la creación de los escenarios las variables V11 y V15, ya que se identificó que las mismas contenían información de medición directa que permitió conocer la intención de los conductores de modificar su ruta y la frecuencia con que lo hacían. Las variables adicionales brindaron una descripción del comportamiento general de los conductores antes el uso de la información, sin embargo, no aseguran que el conductor sigue las instrucciones brindadas.

### **3.5. Conclusiones definición de criterios de penetración de información.**

En total se realizaron un total de 350 encuestas, a partir de las cuales luego de un proceso de verificación y depuración, se usaron para el análisis 326 encuestas. La información recopilada fue validada, encontrando que la muestra se distribuye de forma similar al comportamiento

encontrado en las distribuciones de edades del área metropolitana, y el análisis realizado a partir de la ubicación de las viviendas de los encuestados, se encontró que la ubicación de las viviendas se distribuye de forma aleatoria en el total de los municipios pertenecientes a la zona de estudio.

Se realizó una caracterización socioeconómica de la muestra de población encuestada, obteniendo como resultado una distribución de la población por edades, ocupación, escolarización y estrato. Encontrando que el 53% de los encuestados tenían un rango de edad de entre 30y 50 años, el 47% de los encuestados fueron trabajadores independientes, el 27% de los encuestados contaban con una formación a nivel de secundaria y un 25% más a nivel de pregrado. Respecto al estrato socioeconómico, la mayor participación está asociada a los estratos 3 y 4 con un 33% y 38% respectivamente.

Al analizar los hábitos de conducción de los encuestados, se encontró que el 66% son personas que hacen recorridos en su vehículo más de 4 veces a la semana, lo cual nos indica que existe un alto índice de utilización de los vehículos particulares. Así mismo se encontró que para el 41% de los encuestados, la duración de recorrido comprende entre 16 a 30 minutos, seguidos de 29% para los cuales sus recorridos duran en promedio entre 30 y 60 minutos.

Del total de los encuestados se encontró que un 49.7% de los encuestados hacen uso de las plataformas u aplicaciones que suministran información de tráfico, y que algunos de ellos usan más de un medio de información a la vez, por ejemplo, el 73% de los encuestados usan la plataforma Waze, y algunos de ellos también usan como complemento la plataforma Google Earth identificando un 63% de los encuestados que la usan. Un hallazgo interesante fue encontrar que el 33% de los encuestados usan la radio para adquirir la información sobre el estado de tráfico de la ciudad. Por otro lado, el 71% de los encuestados manifestaron que el principal motivo para realizar las consultas es para evitar la congestión, sin embargo, también se evidencia que existen más de

una razón para la consulta, en donde se encontró que a su vez el 61% lo consulta también para llegar más rápido a su destino, mientras que solo el 32% manifestó no tener conocimiento de la zona por la que se moviliza.

Respecto a la habitualidad de la consulta se encontró que el 52% de los encuestado usan la información menos de la mitad de las veces que conducen, y que un 44% las consultas se realizan de forma ocasional. También se identificó que el 25% de los encuestados modifican su ruta todas las veces que consultan información, el 61% modifican su ruta cuando hay presencia de congestión y la información suministrada ofrece mejores resultados de recorrido, y el momento más usual para realizar la consulta es al iniciar el viaje para el 37% de los encuestados. Respecto a la utilidad de la información, se encontró que el 76% de los encuestado encontraron que la información suministrada es útil, y respecto a la confiabilidad de la información se encontró que para el 70% de los encuestado la información además es confiable, y que el 50% de los encuestados consulta la información la mayoría de las veces que conduce.

Para el caso de los encuestado que no tenían conocimiento sobre el uso de ATIS, se encontró que el 15% no conocían dispositivos o aplicación para consultar la información, sin embargo, al explicar el funcionamiento de estas, el 82% manifestó que usaría las tecnologías disponibles. Un 36% de los encuestados manifestó que aun teniendo conocimiento de los beneficios de las tecnologías prefieren no hacer uso de ellas. El 74% de los encuestados informó que no usan las tecnologías de información actualmente, el 74% manifestó que si se les asegurara información útil y confiable modificarían su ruta de acuerdo a lo sugerido por las tecnologías.

Al analizar el uso de la ATIS a partir de las características generales de la muestra, se evidenció una fuerte tendencia al uso del vehículo particular, encontrando que el 60% de los encuestados usan su vehículo más de 6 veces a la semana. Se encontró que el uso de la información

aumenta proporcionalmente al aumento de edad de los participantes, al igual que se evidenciaba un aumento en el uso a medida que incrementa el estrato socioeconómico de los encuestados. Por otro lado, se encontró que a medida que aumenta la edad de los encuestados, la disponibilidad para usar las tecnologías disminuye.

También se realizó un análisis para determinar la relación existente entre las variables estudiadas, encontrando que la habitualidad de la consulta presenta una asociación con la intención de modificar la ruta y la frecuencia de aceptación de la información, esta asociación indica que los conductores tienen la intención de modificar la ruta la mayoría de veces que consultan la información y a su vez la frecuencia de seguimiento de las instrucciones está muy relacionada a la habitualidad de su consulta.

La variable de intención de modificar la ruta está asociada al momento de uso de la información y a la utilidad de la información, esta asociación indica que es posible que la intención de modificar la ruta pueda verse afectada por el momento en que es consultada la información y que a su vez estas decisiones dependan de la percepción de utilidad de la información por parte del conductor. También se encontró que la frecuencia de aceptación de la información está relacionada con la variable de momento de uso de la consulta, lo cual indica que dependiendo el momento en que los usuarios consulten la información, la frecuencia de aceptación de la información se verá afectada.

Finalmente, se encontró que la utilidad está asociada a la confiabilidad, lo que nos indica que, para los encuestados, la utilidad de la información está ligada a que la información tenga un alto grado de confiabilidad. El análisis realizado buscó identificar las variables que afectan de forma directa la tasa de aceptación de la información por parte del usuario, estudiando a fondo la

relación existente entre las variables y determinando si la distribución de las observaciones de una variable difiere dependiendo de las categorías establecidas para otra variable

Con base en todos los supuestos obtenidos de la información recolectada, se definieron 7 escenarios con diferentes tasas de aceptación de la información por parte de los conductores de la zona de estudio, proponiendo dos escenarios de referencia para estudiar el comportamiento de los flujos en escenarios críticos de no existencia de información y uno de aceptación total de la información. Se propuso un escenario medio planteado desde el resultado obtenido donde la mitad de los encuestados usaba la información y la otra mitad no la usaba, sin considerar ninguna variable adicional, un escenario optimista en el cual se espera un aumento en la aceptación de la información sumando los conductores que conocieron las herramientas ATIS, y tres escenarios realistas basados en la frecuencia de uso de la información, el momento de la consulta, y el uso de la información proporcionada.

#### **4. Construcción de un modelo de meso-simulación para el área metropolitana de Bucaramanga**

Como soporte para la evaluación de las tasas de suministro de información estimadas, se construyó un modelo de meso simulación que buscó representar los efectos de la implementación de ATIS en el área metropolitana de Bucaramanga. Para tal fin, se recopiló información existente del trazado de la red vial, conteos vehiculares, dimensiones de la infraestructura, matrices OD, velocidades, entre otros. Se procedió a realizar la actualización de la información existente para la conformación del modelo y posteriormente se procedió a validar y calibrar con el objetivo de corroborar si los resultados obtenidos corresponden a la situación actual de la zona en estudio. A continuación, se presenta en detalle el procedimiento realizado para la obtención del modelo de simulación.

##### **4.1. Preparación de los insumos requeridos para la construcción del modelo de simulación.**

Los modelos de simulación de transporte están compuestos por dos insumos principales, la oferta y la demanda asociada a la zona que se pretende estudiar. La oferta incluye la información y características asociadas a las secciones de vías y a los nodos o intersecciones, y otros objetos fundamentales para la simulación como las características de los vehículos, usuarios y los propósitos de viaje. (Aimsun 20.1, 2017)

La demanda por otra parte describe el modo, la cantidad, el origen y destino de los viajes realizados en la red estudiada en cierto periodo de tiempo, los cuales pueden ajustarse y/o compararse con información de flujos observados en puntos de interés de la zona en estudio.

Adicionalmente es necesario contar con la configuración de centroides para la demanda la cual está basada en la matriz OD y que puede definirse de acuerdo con los usos de suelo de la ciudad.

El siguiente apartado describe la metodología usada para actualizar y adecuar la información existente, de forma que fue posible generar los insumos base de la oferta y demanda requerida para la ejecución del modelo de simulación del área metropolitana de Bucaramanga.

#### ***4.1.1. Actualización de la oferta de transporte del área metropolitana de Bucaramanga.***

La oferta de transporte de un municipio está representada por la infraestructura vial disponible para efectuar desplazamientos, los equipos o vehículos que se desplazan por la red de transporte y un conjunto de reglas representadas por semáforos, restricciones, tarificación, entre otras que hacen posible el funcionamiento conjunto de un sistema que presta un servicio a las personas que requieren desplazarse de un punto a otro. (Ortuzar & Willumsen, 2011) A continuación, se presenta el trabajo realizado para la definición, adecuación y verificación de la red de transporte del área metropolitana de Bucaramanga.

##### **4.1.1.1. Actualización de la información secundaria disponible de la malla vial del área metropolitana de Bucaramanga.**

La malla vial del área metropolitana de Bucaramanga usada como base para el presente estudio consta de aproximadamente 25.968 segmentos de vías y 16.328 intersecciones, se deriva de la actualización realizada en el año 2018 en el marco del Convenio Interadministrativo No 273 celebrado entre la Universidad Industrial de Santander (UIS) y el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) para la consolidación del Sistema de Información Geográfica (SIG) del AMB. El proyecto realizó la estructuración y actualización de la malla vial, contempló la revisión de la malla vial preexistente en cuanto a nomenclatura, estructura y cumplimiento de reglas

topológicas que permiten identificar errores de trazado en la red, a la vez que se realizó una restitución completa del trazado vial de los cuatro municipios. (AMB & UIS, 2018)

La información anterior fue complementada con los datos de anchos de calzada, anchos de carril, anchos de berma y números de carriles existen en el inventario de pavimentos realizado para el Municipio de Bucaramanga<sup>††</sup>, y en la información contenida en los Planes Maestros de Movilidad de los Municipios de Floridablanca, Girón y Piedecuesta.<sup>‡‡</sup>

La información general recolectada fue revisada, depurada y organizada, conservando únicamente la información de interés para el proyecto. En la *Tabla 12* se presentan los atributos que fueron conservados y que fueron la base para el trabajo realizado posteriormente.

**Tabla 12**

*Atributos de interés asociados a la malla vial del área metropolitana de Bucaramanga.*

| <b>Campo</b>      | <b>Descripción</b>   |
|-------------------|--|
| <b>ID:</b>        | Identificación automática dada por el software a cada uno de los segmentos. Este campo se convierte en la llave maestra de la base de datos. |
| <b>LONG_KM:</b>   | Corresponde a la longitud del segmento dada en kilómetros y asignada automáticamente por el software. La unidad utilizada es Km.             |
| <b>DIR_FLUJO:</b> | Corresponde a la dirección de flujo admisible para cada segmento de vía.   |
| <b>MUNICIPIO</b>  | Relaciona el municipio al cual pertenece el segmento de vía  |

<sup>††</sup> Caracterización de las vías de mediano y bajo flujo vehicular, implementación de un sistema de gestión de pavimentos para la malla vial vehicular y modelamiento, diagnóstico y alternativas de solución para la movilidad urbana del Municipio de Bucaramanga. Municipio de Bucaramanga y Universidad Industrial de Santander. 2010.

<sup>‡‡</sup> Consultoría para la elaboración del Plan Maestro de Movilidad de los Municipios de Floridablanca, Girón y Piedecuesta, la articulación de los Planes de Movilidad de los Municipios al Plan de Movilidad del Municipio de Bucaramanga y su compilación en un Plan Maestro de Movilidad Metropolitano. Área Metropolitana de Bucaramanga y Universidad Industrial de Santander. 2011

|                         |   |
|-------------------------|---|
| <b>NOMENCLATURA</b>     | Corresponde a la nomenclatura asignada por cada municipio como identificación del segmento.     |
| <b>N_CARRILES</b>       | Relaciona el número de carriles existente en cada segmento                                      |
| <b>USO VIAL</b>         | Relaciona el uso vial relacionado a cada segmento, indicando si es de uso vehicular o peatonal. |
| <b>ANCHO DE CALZADA</b> | Relaciona el ancho de calzada de cada segmento de vía indicando la longitud en metros.          |
| <b>ANCHO DE CARRIL</b>  | Relaciona el ancho de carril de cada segmento de vía indicando la longitud en metros.           |

*Nota. Elaboración propia con base en información suministrada.*

La información existente permitió consolidar una malla vial base la cual se ajustó y complementó con los atributos que se presentan en la *Tabla 13*.

**Tabla 13**

*Atributos asignados a la malla vial actualizada.*

| <b>Atributo</b>      | <b>Descripción</b>  |
|----------------------|---|
| <b>JER_VIAL</b>      | Jerarquía vial. Esta información está basada en la clasificación vial establecida para cada municipio. Se contemplan diferentes categorías que incluyen vías primarias, secundarias y terciarias. La información se detalla en un capítulo posterior. |
| <b>ALPHA</b>         | Parámetro de modelamiento de la función de volumen – demora (BPR).  |
| <b>BETA</b>          | Parámetro de modelamiento de la función de volumen – demora (BPR).  |
| <b>CAP_AB</b>        | Capacidad vial soportada por la vía en el sentido AB de circulación en función de sus características viales. La unidad utilizada es vehículos en el periodo pico analizado.  |
| <b>CAP_BA</b>        | Capacidad vial soportada por la vía en el sentido BA de circulación en función de sus características viales. La unidad utilizada es vehículos en el periodo pico analizado.  |
| <b>VEL_OPER_PROM</b> | Velocidad de operación promedio del segmento de vía. La unidad utilizada es km/h  |
| <b>TIME_AB</b>       | Tiempo de recorrido en el sentido AB de circulación calculado en función de la longitud y la velocidad.   |

|                    |   |
|--------------------|---|
| <b>TIME_BA</b>     | Tiempo de recorrido en el sentido BA de circulación calculado en función de la longitud y la velocidad. |
| <b>AUTOS_AB</b>    | Cantidad de automóviles aforados en el sentido AB de circulación. La unidad utilizada es vehículos.     |
| <b>AUTOS_BA</b>    | Cantidad de automóviles aforados en el sentido BA de circulación. La unidad utilizada es vehículos.     |
| <b>MOTOS_AB</b>    | Cantidad de motos aforadas en el sentido AB de circulación. La unidad utilizada es vehículos.           |
| <b>MOTOS_BA</b>    | Cantidad de motos aforadas en el sentido BA de circulación. La unidad utilizada es vehículos.           |
| <b>CAMIONES_AB</b> | Cantidad de camiones aforados en el sentido AB de circulación. La unidad utilizada es vehículos.        |
| <b>CAMIONES_BA</b> | Cantidad de camiones aforados en el sentido BA de circulación. La unidad utilizada es vehículos.        |
| <b>BUSES_AB</b>    | Cantidad de buses aforados en el sentido AB de circulación. La unidad utilizada es vehículos.           |
| <b>BUSES_BA</b>    | Cantidad de buses aforados en el sentido BA de circulación. La unidad utilizada es vehículos.           |
| <b>EQUIV_AB</b>    | Cantidad de vehículos equivalentes en el sentido AB de circulación. La unidad utilizada es vehículos.   |
| <b>EQUIV_BA</b>    | Cantidad de vehículos equivalentes en el sentido BA de circulación. La unidad utilizada es vehículos.   |

---

*Nota. Elaboración propia con base en información suministrada.*

La información para la ciudad de Bucaramanga fue actualizada mediante una pasantía de investigación que buscó actualizar el modelo de asignación de tráfico utilizado en la priorización de proyectos de infraestructura en la ciudad de Bucaramanga<sup>§§</sup>. La información relacionada con

---

<sup>§§</sup> Pasantía de investigación en el grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas, para ajustar el modelo de asignación de tráfico utilizado en la priorización de proyectos de infraestructura vial en la ciudad de Bucaramanga. Johanna María Abreo Ortiz - 2018

los Municipios de Girón, Piedecuesta y Floridablanca fue actualizada en esta investigación, con base en el levantamiento de información primaria, imágenes satelitales y la aplicación Google Earth.

#### **4.1.1.2. Definición de una red análoga de transporte para el desarrollo de la modelación**

Para el marco de modelado propuesto en la presente investigación, se propuso el estudio de una red de transporte simplificada para el área metropolitana de Bucaramanga, la cual se basa en la red primaria, secundaria, terciaria, y la mayor parte de la red local de los Municipios que lo conforman. La simplificación de la red fue un proceso extenso y minucioso que incluyó un análisis de conectividad y una evaluación detallada de los atributos asociados a cada uno de los segmentos perteneciente al área en estudio. El propósito central de este ejercicio fue optimizar el estudio de la infraestructura vial y disminuir los tiempos de procesamiento, cuidando en todo momento de no entorpecer la redistribución de los flujos, el cual fue el objetivo principal de la presente investigación.

Es así como finalmente se generó una red de transporte análoga que buscó modelar la propagación de la congestión y los efectos que tiene la información suministrada a los viajeros a través de las ATIS, considerando el estudio de las vías primarias de los municipios que albergan el mayor flujo de vehículos y son usadas con mayor frecuencia para solventar los desplazamientos de la población desde los diferentes orígenes y destinos. Se consideraron de igual forma las vías secundarias y terciarias como vías alternas de conexión y soporte para realizar la redistribución de los flujos buscando aliviar la congestión en los corredores principales; y las vías locales de primer grado como vías de alimentación y conexión a los puntos de origen destino. Las vías locales de

segundo grado se excluyeron del estudio ya que la evaluación realizada permitió determinar que estas vías no ofrecían beneficios de conexión para la redistribución requerida en el proyecto.

Con base en imágenes satelitales y con Google Earth, fue posible verificar los trazados de los segmentos viales y cuando fue necesario se actualizaron las características relacionadas con la infraestructura como uso vial, dirección de flujo, nomenclatura, entre otros. Por otra parte, con el fin de obtener un patrón lógico de alimentación se adecuó la red vial de acuerdo con las necesidades del modelo, generando algunas conexiones vehiculares o flujos en sentidos bidireccionales

A continuación, se presenta en detalle la verificación realizada a la malla base y las diferentes consideraciones que fueron tenidas en cuenta la definición de la red análoga de transporte.

- Jerarquización

La simplificación propuesta para la red análoga se basó en la selección de los corredores de acuerdo con la jerarquización asignada a los segmentos viales, buscando obtener una configuración lógica con base en las características de conexión y articulación de los diferentes ejes viales. El análisis se centró en el comportamiento de las vías primarias o de articulación nacional, vías secundarias, terciarias e intermedias, como corredores de articulación entre las cabeceras del área metropolitana. Las vías locales no fueron consideradas como parte del análisis que se abordó en la presente investigación, debido a que son vías de conexión a viviendas que no permiten una conexión con la red vial principal, por lo cual no son consideradas para la redistribución de flujos buscada en el proyecto. Sin embargo, se incluyeron las de primer nivel ya que son vías de importancia para la alimentación y conexión entre zonas del modelo.

El análisis de la jerarquización consistió en realizar una comparación entre la información consignada los atributos de la malla vial base, y las disposiciones dadas en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y los Planes Maestros de Movilidad (PMM) municipales. Para Bucaramanga se encontró que la jerarquización se asignó según lo establecido en el POT y PMM municipal, sin embargo, la categoría de vías locales no contempló la subdivisión establecida de “vía local 1” y “vía local 2”, por lo cual fue necesario realizar dicha distinción en los segmentos de vía. Para los municipios de Girón, Floridablanca y Piedecuesta, fue evidente que existen diferencias en la jerarquización asignada entre las diferentes fuentes y que no existía un lenguaje común entre las clasificaciones internas establecidas por cada uno de los municipios, de forma que no fue posible a partir de esta información integrarlas en un mismo modelo jerárquico.

Para el caso particular de Floridablanca, se encontró que la jerarquización propuesta en la última actualización de POT en año 2018, contempla una jerarquización vial que distribuye la clasificación en arterial, intermedia y local. La red vial arterial e intermedia se sub-clasifica en red primaria, secundaria y terciaria, y la red vial local en nivel uno y nivel dos. De acuerdo con esta clasificación y a lo expuesto en el PMM del municipio, se propuso realizar una homologación de la clasificación adoptando lo dispuesto en el PMM, según se muestra en la *Tabla 14*.

**Tabla 14**

*Homologación de la jerarquización vial para el municipio de Floridablanca.*

| <b>Jerarquización POT</b>  | <b>Jerarquización PMM</b> |
|----------------------------|---------------------------|
| <b>Arteria Primarias</b>   | Red vial Primeria         |
| <b>Arteria Secundarias</b> | Red vial secundaria       |
| <b>Arteria Terciarias</b>  | Red vial Intermedia       |
| <b>Intermedia Primaria</b> | Red vial Intermedia       |

|                              |                     |
|------------------------------|---------------------|
| <b>Intermedia Secundaria</b> | Red vial Intermedia |
| <b>Intermedia Terciaria</b>  | Red vial local 1    |
| <b>Local nivel 1</b>         | Red vial local 1    |
| <b>Local nivel 2</b>         | Red vial local 2    |

---

*Nota. Elaboración propia.*

Para los Municipios de Piedecuesta y Girón, se encontró que si bien sus Planes Básicos de Ordenamiento Territorial (POBT) estaban en proceso de actualización, a la fecha en que se desarrolló esta investigación los documentos no se habían aprobado por lo cual aún seguían vigentes los definidos en los años 2001 y 2010 respectivamente, a partir de esta información se realizó un análisis concluyendo que no era posible homologar lo dispuesto en una jerarquización metropolitana, ya que contaban con marcadas diferencias en la clasificación de su infraestructura vial.

Con base en estos hallazgos, y considerando que los PMMs sí ofrecían información orientada a un marco de jerarquización metropolitano con un lenguaje común, se decidió tomar como base para la integración esta información, considerando algunas modificaciones orientadas a acoplar las proyecciones contempladas en los PMMs con la situación actual de la red definida por los POTs. De la misma forma, se incluyeron los nuevos desarrollos viales que se han implementado en los cuatro municipios, los cuales no contaban con una asignación de jerarquía vial debido a que su construcción es relativamente reciente, por tanto, se les asignó la jerarquía dando continuidad a las vías que alimentan estas infraestructuras ya sean intercambiadores, transversales o nuevas conexiones.

Es así como fue posible definir una jerarquización unificada y coherente que permitió generar uniformidad en la clasificación en los segmentos viales de los límites municipales y en las conexiones intermunicipales.

- Asignación del sentido de flujo vehicular

La información relacionada con el sentido del flujo vehicular asignado a cada segmento de vía está estipulado en los atributos de la malla vial base metropolitana. Sobre esta información, se realizó una revisión y actualización con base en Google Earth, validando los sentidos viales y considerando la codificación que se muestra a continuación:

- ✓ 1= Todos aquellos tramos con un sentido de flujo en el sentido contrario al sentido de dibujo del elemento.
- ✓ 0= Todos aquellos tramos con doble sentido de flujo vehicular.
- ✓ 1= Todos aquellos tramos con un sentido de flujo en el mismo sentido al sentido de dibujo del elemento.
- ✓ 2= Todos aquellos elementos con que no tienen un uso vehicular.

Está revisión fue realizada sobre la malla vial simplificada, ya que la actualización implica un esfuerzo considerable y renovar esta información para la totalidad de la malla base no hace parte de los alcances de la presente investigación. La simplificación considera la definición de segmentos de circulación acorde con las necesidades de conexión vehicular a las diferentes zonas en estudio.

- Velocidad promedio de operación [km/h]

La velocidad del sistema vial de los municipios se estableció conforme a la asignación jerárquica de cada segmento vial. Sin embargo, la malla base contaba con información preexistente de velocidades y ya que las proyecciones realizadas en los planes en el año 2011 se han

implementado en un porcentaje muy bajo, se validó la información base asignada en la malla vial con respecto a lo definido en los PMMs y se actualizó en los casos en que no había asignado el atributo.

Considerando que el PMM definió las velocidades para los diferentes segmentos viales de acuerdo a las jerarquías asignadas, la actualización podría haberse realizado acatando lo dispuesto en los planes, sin embargo, considerando que las condiciones actuales de la infraestructura en los municipios no se ajustan en su totalidad a las proyecciones realizadas, acatar lo dispuesto en los PMMs podría hacer que la red de transporte metropolitana no fuera representativa de la situación actual de los municipios.

Igualmente se realizó una revisión minuciosa identificando los segmentos viales que sufrieron cambios en su jerarquización y se ajustaron de acuerdo con los límites establecidos. En otros casos con base en el conocimiento del investigador de la infraestructura vial del municipio y del comportamiento de los flujos vehiculares, se validaron las velocidades existentes.

Se encontró que aun cuando la jerarquía corresponde a niveles superiores de velocidad, existen vías de conexión u alimentación a los intercambiadores que no operan con las velocidades límites establecidas. Por tal razón, en las vías asociadas a glorietas, retornos, alimentaciones y entregas de intercambiadores a vías de gran importancia se asignó una velocidad de 20 km/hora, previendo que las condiciones que se establezcan en el modelo se asemejen lo más posible al comportamiento real del conductor.

Los límites definidos para cada segmento vial se encuentran en la *Tabla 15*. Adicionalmente se encuentra asignados en la geodatabase de la red de transporte simplificada para su consulta. Revisar *Apéndice L*.

**Tabla 15**

*Velocidades asignadas a la red simplificada.*

| <b>Municipio</b>     | <b>Jerarquía</b>   | <b>Velocidad asignada</b> |
|----------------------|--------------------|---------------------------|
| <b>Bucaramanga</b>   | Vía principal – V1 | 60                        |
| <b>Bucaramanga</b>   | Vía primaria       | 60                        |
| <b>Bucaramanga</b>   | Vía secundaria     | 50                        |
| <b>Bucaramanga</b>   | Vía terciaria      | 40                        |
| <b>Bucaramanga</b>   | Vía Local 1        | 20                        |
| <b>Floridablanca</b> | Vía primaria       | 60                        |
| <b>Floridablanca</b> | Vía secundaria     | 50                        |
| <b>Floridablanca</b> | Vía terciaria      | 40                        |
| <b>Floridablanca</b> | Vía Local 1        | 20                        |
| <b>Girón</b>         | Vía primaria       | 60                        |
| <b>Girón</b>         | Vía secundaria     | 50                        |
| <b>Girón</b>         | Vía intermedia     | 40                        |
| <b>Girón</b>         | Vía Local 1        | 20                        |
| <b>Piedecuesta</b>   | Vía primaria       | 60                        |
| <b>Piedecuesta</b>   | Vía secundaria     | 50                        |
| <b>Piedecuesta</b>   | Vía intermedia     | 40                        |
| <b>Piedecuesta</b>   | Vía Local 1        | 20                        |

*Nota. Elaboración propia con base en los Planes Maestros de Movilidad de los Municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta.*

- Tiempo a flujo libre (Hora)

El parámetro tiempo AB/BA, se determinó en minutos en función de la longitud del tramo vial y la velocidad de operación, según se muestra a continuación:

$$t = \frac{d}{v} * 60$$

Donde  $t$  es el tiempo AB o BA,  $d$  la distancia de cada tramo y  $v$  la velocidad de operación, esto se multiplica por 60 con el fin de dejar este tiempo en minutos.

Se asignó el valor al parámetro según el cálculo realizado y considerando la dirección del flujo, sea AB o BA. La asignación de los datos concuerda con las definiciones dadas en el campo de sentido de flujo que se describió anteriormente.

- Flujos vehiculares

La malla vial base cuenta con información de flujos vehiculares asignados a algunos segmentos viales del área metropolitana los cuales corresponden a los aforos realizados en el año 2009, la información fue actualizada mediante la realización de conteos vehiculares en las intersecciones más importantes de los cuatro municipios, entre los años 2017, 2018 y 2019, mediante el desarrollo de diferentes proyectos de pregrado y de levantamientos de información realizados en el marco del diplomado de “Uso de nuevas tecnologías para la investigación aplicada a la Ingeniería”, adscrito al grupo de investigación Geomática. En el *Capítulo 4.1.2 apartado e*, se muestran los puntos en donde se realizó el levantamiento de información.

La información base asignada a la red consideraba la asignación de los volúmenes vehiculares en la hora punta del tránsito para el área metropolitana en el año 2009 la cual correspondía al periodo comprendido entre las 11:30 am a 12:30 pm. La pasantía de investigación realizada por Abreo (2018), determinó que para el año 2017 los patrones de viaje de la ciudad habían variado, encontrando que la hora pico se desplazó a periodo de la tarde entre las 06:30 pm y las 07:30 pm.

Es así como la información asignada a la malla vial actualizada corresponde a los flujos de la hora punta identificada, para los cuales se seleccionaron las vías de mayor importancia que a su vez poseen los volúmenes vehiculares más altos de la ciudad. La información relacionada con los conteos se presenta en *Apéndice N*.

- Vehículos equivalentes por sentidos de circulación AB/BA

Los vehículos equivalentes fueron calculados con base en los aforos actualizados, Los factores de equivalencia se tomaron según lo establecido en el Manual de Diseño Geométrico de

Carreteras (Instituto Nacional de Vías, 2008) y se presentan a continuación. La información puede ser consultada en la geodatabase de *Apéndice L* y la tabla de atributos en el *Apéndice O*.

**Tabla 16**

*Factores de equivalencia seleccionados para la definición de los vehículos equivalentes.*

| <b>Tipo de vehículo</b>                      | <b>Factor de vehículo equivalente</b> |
|--|---------------------------------------|
| <b>Motocicletas</b>                          | 1                                     |
| <b>Automóviles</b>                           | 1                                     |
| <b>Buses</b>                                 | 3                                     |
| <b>Vehículos de carga medianos y pesados</b> | 3                                     |

*Nota. Elaboración propia con base en el manual de diseño geométrico de carreteras.*

- Capacidad vial.

La capacidad vial representa el número máximo de vehículos que puede transitar por un punto o corredor. (Instituto Nacional de Vías, 2008) La metodología seleccionada para el cálculo de la capacidad de los segmentos viales de la red análoga del área metropolitana de Bucaramanga, se derivó de una revisión bibliográfica que incluyó la revisión de diferentes manuales colombianos entre los cuales se consideró los Manuales de Capacidad y Niveles de Servicio para carreteras de dos carriles y para vías multicarril, al igual que el manual de Diseño Geométrico de Carreteras. El resultado de dicha revisión permitió determinar que las metodologías propuestas son una adaptación de la metodología propuesta en el Highway Capacity Manual (HCM), y que dicha metodología es ampliamente usada en Latinoamérica (Instituto Nacional de Vías, 2020), por lo cual la capacidad fue asignada a los segmentos viales de la red vial análoga según la metodología propuesta por el HCM 2010, como se muestra a continuación:

$$Sf_i = 1600 \left( \frac{v}{c} \right)_i f_d f_w f_{HV} F_A$$

La capacidad para un nivel de servicio  $i$  ( $Sf_i$ ), se calcula con base en el valor del flujo de saturación el cual se estableció como la capacidad vial base de 1600 veh/hora/carril asignado para el área metropolitana de Bucaramanga (Castillo et al., n.d.), a partir del cual se ajusta la capacidad por medio de diferentes factores de ajuste que permiten obtener el cálculo de la capacidad vial. Los Factores contemplan la relación volumen capacidad para un nivel de servicio  $i$   $\left(\frac{v}{c}\right)_i$  definida para cada segmento vial, un factor de reducción de la capacidad por distribución direccional ( $f_d$ ), un valor de factor de reducción por carriles y bermas angostos ( $f_w$ ), un factor de reducción por la presencia de vehículos pesados ( $f_{HV}$ ) y un factor de reducción por el entorno de la vía ( $f_A$ ). La información del cálculo realizado para cada uno de los segmentos viales se presente en el *Apéndice O*.

- Parámetros Alpha y Beta

La función de demora Bureau of Public Roads (BPR) hace parte del proceso de asignación de los modelos de simulación de planificación de transporte, a partir de los cuales se estiman los valores de tiempo de viaje de la red. Para realizar el respectivo calculo, se requiere definir los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ , donde “el parámetro  $\alpha$  determina la relación de la velocidad de flujo libre y la velocidad de congestión y el parámetro  $\beta$  determina con qué rapidez disminuye la velocidad al aumentar la relación del volumen y la capacidad ( $V / C$ )” (Lizarbe, 2015)

Con el fin de estimar dichos parámetros para el contexto del área metropolitana de Bucaramanga, en primer lugar, se realizó una búsqueda bibliografía con el propósito de encontrar estudios que hubieran identificado estos parámetros para el contexto de la ciudad. Ya que no fue posible encontrar los parámetros ajustados específicamente para el área de estudio, se procedió a buscar aproximaciones en el contexto colombiano, encontrando estimaciones realizadas para la

red estratégica de transporte de carga colombiana (G. Márquez & Cantillo, 2011), estimaciones en vías multicarriles de Bogotá (L. Márquez, García, & Guarín, 2014) y estimaciones realizadas para el tráfico privado en la red principal de la capital (Cuellar, 2016), entre otras.

Se procedió a evaluar la pertinencia de la aplicación de estos parámetros en el contexto del área metropolitana de Bucaramanga, y se encontró que en todos los casos las condiciones bajo las cuales se habían estimado diferían en gran medida con las condiciones de la ciudad. Por ejemplo, se encontró que la estimación de  $\alpha$  y  $\beta$  realizadas para la red nacional, fue obtenida mediante experimentación simulando modelos bajo diferentes condiciones y comparando sus resultados con información de conteos provenientes de observaciones de campo. El conjunto de valores que logró una mejor aproximación fue el 0.15 y 4 respectivamente. (G. Márquez & Cantillo, 2011) Sin embargo, esta estimación se obtuvo estudiando infraestructura para transporte nacional, con condiciones de velocidad, capacidad y distribución modal, que difieren significativamente de las encontradas en el contexto urbano.

Los estudios realizados en la ciudad de Bogotá se orientaron a la evaluación estadística de diferentes valores de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  incluyendo los valores típicos de 0.15 y 4 respectivamente (Federal Highway Administration, 2014). Se construyeron modelos que fueron calibrados mediante observaciones de tiempos y flujos, realizando evaluaciones estadísticas con el fin de identificar el valor de los parámetros que se ajustaran más a el modelo BPR.

Para el caso específico del estudio de corredores localizados en las principales autopistas de la ciudad de Bogotá en donde las velocidades oscilan entre 71,57 y 104,25 Km/h, se encontró valores que oscilan para  $\alpha$  entre 0,471 y 1,390 y valores de  $\beta$  entre 2,097 y 3,505. El ajuste obtenido de los parámetros estimado para el mejor modelo BPR, fue comparado con el ajuste obtenido para los valores estándar de 0.15 y 4, encontrando que este último era muy inferior a la estimación

realizada. Una última conclusión relevante del estudio indica que al usar los valores típicos de  $\alpha$  y  $\beta$  es posible subestimar los valores de tiempo de viaje en los segmentos de la red. (L. Márquez et al., 2014)

Ya que el contexto de estudio en la capital del país sobre pasa considerablemente las condiciones de infraestructura vial y volúmenes vehiculares existentes en el área metropolitana de Bucaramanga, considerando velocidades, flujos y capacidades muy superiores, se procedió a realizar una revisión que permitiera identificar el manejo de estos parámetros en países latinoamericanos.

Se encontraron dos estudios que fueron de interés del investigador, uno fue realizado por el Instituto Mexicano del Transporte y estudia las funciones volumen-demora en la modelación de flujos vehiculares. (Moreno, Rico, & Bustos, 2014) Otro estudio fue el realizado para la calibración de las funciones Volumen Demora en el caso de estudio de las redes viales principales de la ciudad de Ayacucho, Perú. (Lizarbe, 2015).

El primer estudio realizado por Moreno et al. (2014), analizó los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  reportados por el HCM 2000 para autopistas y vías multicarril, se encontró que la estimación de los parámetros se ve afectada por el tipo de acceso existente en cada tipo de vía ya que un acceso no controlado puede afectar la velocidad y flujo. También se identificó que un bajo tránsito de vehículos de carga puede favorecer las condiciones de tránsito en la vía dando mayor libertad de maniobra y de elección de velocidad de circulación y que los niveles de servicio de los segmentos viales influyen en la estimación del valor del parámetro, ya que a medida que disminuye el nivel de servicio, los usuarios empiezan a verse significativamente afectados por el nuevo flujo en el segmento vial.

El estudio realizado por Lizarbe (2015), buscó calibrar los valores de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  para un modelo de transporte de la ciudad de Ayacucho, Perú. La investigación contempla un primer análisis en el cual al igual que en el estudio antes mencionado, se realiza un análisis del comportamiento de los parámetros definidos por el HCM 2000. Posteriormente, con base en información propia del área de estudio y habiendo seleccionados las vías con mayores volúmenes vehiculares para su estudio, se realizó la estimación de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  bajo las condiciones de capacidad y velocidad existentes en la ciudad.

Como se ha visto, los esfuerzos para seleccionar los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  a implementar en la función de demora del modelo del área metropolitana de Bucaramanga, consideró la evaluación de las características de infraestructura vial de las zonas en estudio, así como los volúmenes vehiculares, capacidades y velocidades consideradas en cada investigación, con el fin de encontrar similitudes que permitieran extrapolar dichos valores en el contexto metropolitano. También fueron considerados para su aplicación los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  recomendados por el HCM, sin embargo, las características de las vías tomadas como referencia poseen especificaciones muy superiores a las establecidas en la zona de estudio.

Finalmente, ya que no fue posible identificar un estudio con el que fuera posible extrapolar los valores de  $\alpha$  y  $\beta$ , se procedió a tomar como base un precedente de modelación en el área metropolitana para la definición de los parámetros. El modelo de asignación de tráfico realizado por Castillo, Martínez, & Porras, (s.f.), priorizó la inversión en infraestructura vial para el área metropolitana, evaluando cinco de las principales proyecciones de infraestructura planteadas para mejorar las condiciones de conexión y movilidad entre los municipios. El estudio contempló para su ejecución los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  definidos por Fehr & Peers (2010), con los cuales fue posible

obtener un modelo calibrado para la evaluación propuesta en el área metropolitana de Bucaramanga.

Considerando lo anterior, el presente estudio implementó los valores presentados por Fehr & Peers (2010), en donde se definen pautas para la selección de los parámetros con base en las velocidades y capacidades de diferentes tipos de vías y ofrece una clasificación que permite la homologación con la jerarquización establecida para el área metropolitana de Bucaramanga. La *Tabla 17* muestra los valores definidos para los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ , los cuales se clasifican según las capacidades y velocidades existentes en los diferentes tipos de vías.

**Tabla 17**

*Valores de  $\alpha$  y  $\beta$  definidos por Fehr & Peers (2010).*

| <b>Nombre de la clasificación</b> | <b>Alpha</b> | <b>Beta</b> |
|-----------------------------------|--------------|-------------|
| <b>Autopista</b>                  | 0.78         | 2.50        |
| <b>Rampa</b>                      | 0.78         | 2.50        |
| <b>Arteria Rural</b>              | 0.65         | 4.50        |
| <b>Arteria Urbana</b>             | 0.40         | 5.50        |
| <b>Colector Rural</b>             | 0.70         | 4.00        |
| <b>Colector Mayor</b>             | 0.70         | 4.00        |
| <b>Colector Menor</b>             | 0.70         | 4.00        |
| <b>Local</b>                      | 0.78         | 3.80        |
| <b>Conector a centroide</b>       | 0.15         | 4.00        |

*Nota. Elaboración propia con base en (Fehr & Peers, 2010)*

A partir de la clasificación vial presentada se realizó una homologación a la infraestructura vial del área metropolitana, teniendo como base la jerarquización asignada a los diferentes corredores y sus características de velocidad y capacidad. La homologación realizada respecto a la clasificación vial propuesta por Fehr & Peers (2010) contempló la asignación de velocidades mayoradas en 20 Km/h, con el fin de contemplar un escenario crítico en la simulación. La *Tabla 18* muestra la asignación de parámetros realizadas a partir de la jerarquización vial existente.

**Tabla 18**

*Asignación de parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ , según jerarquización metropolitana*

| <b>Jerarquía</b>      | <b>Vel<br/>(Km/h)</b> | <b>Velocidad<br/>mayorada<br/>(Km/h)</b> | <b>Homologación</b> | <b>Vel<br/>(mph)</b> | <b>Vel <math>\approx</math><br/>(Km/h)</b> | <b>Capacidad</b> | <b>Alpha</b> | <b>Beta</b> |
|-----------------------|-----------------------|--|---------------------|----------------------|--|------------------|--------------|-------------|
| <b>Vía Local</b>      | 20                    | 40                                       | Local               | 25                   | 40   | 400              | 0.78         | 3.80        |
| <b>Vía Intermedia</b> | 40                    | 60                                       | Arteria urbana      | 35-40                | 60   | 900-1000         | 0.40         | 5.50        |
| <b>Vía terciaria</b>  | 40                    | 60                                       | Arteria urbana      | 35-40                | 60   | 900-1000         | 0.40         | 5.50        |
| <b>Vía Secundaria</b> | 50                    | 70                                       | Arterial rural      | 40-50                | 80   | 700-1000         | 0.65         | 4.50        |
| <b>Vía Primaria</b>   | 60                    | 80                                       | Autopista           | 55-65                | 90   | 2000             | 0.78         | 2.50        |
| <b>Vía principal</b>  | 60                    | 80                                       | Autopista           | 55-65                | 90   | 2000             | 0.78         | 2.50        |

*Nota. Elaboración propia con base en (Fehr & Peers, 2010)*

- Elementos de control de tráfico

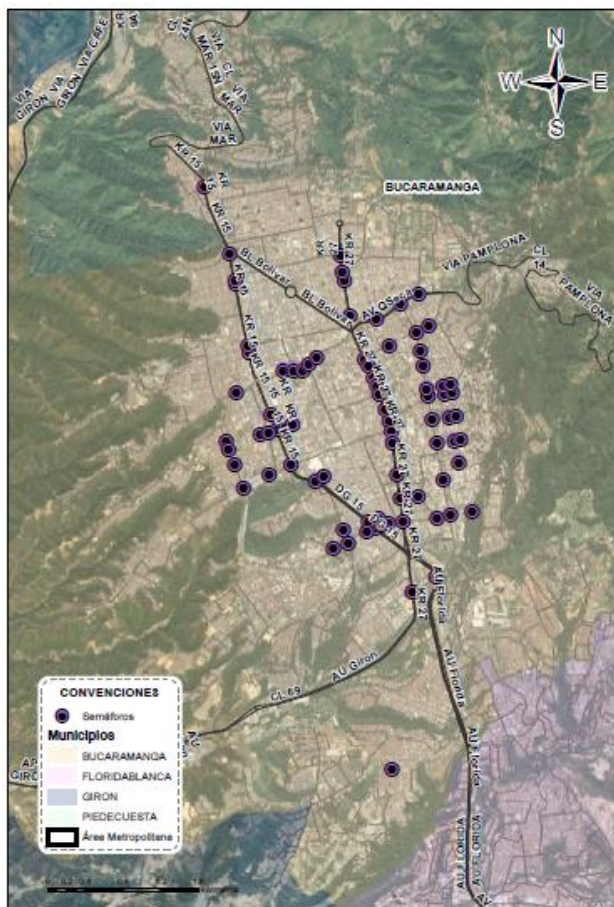
Para la construcción del modelo de simulación fue necesario definir un conjunto de elementos de control, los cuales son principalmente señalización, semaforización, definición de movimientos no permitidos y penalizaciones de giro, ubicados principalmente en las intersecciones o nodos de la red vial, con el propósito de evitar o resolver conflictos entre giros y así representar la operación normal del tráfico en las ciudades.

Estos elementos de señalización y restricciones de giro fueron ubicados de acuerdo con la información secundaria disponible derivada de los PMMs municipales (UIS, 2010), la cual fue actualizada mediante Google Earth; la señalización consistió en elementos de control como ceda al paso, pares y la definición de zonas de bloqueo en intersecciones. Para el caso de la

semaforización, se realizó un levantamiento de información de fases y tiempos semafóricos, en los puntos que se indican en la *Figura 30*.

### Figura 30

*Levantamiento de fases y tiempos semafóricos.*



*Nota. Elaboración propia.*

#### **4.1.2. Actualización de la demanda de viajes para el área metropolitana de Bucaramanga.**

La demanda de transporte comprende los viajes realizados por personas para satisfacer una necesidad, que incluye los desplazamientos requeridos para el transporte de bienes y mercancías. La demanda puede definirse por medio de matrices origen- destino que se asocian a periodos de

tiempo y modos de transporte específicos que indican la cantidad de desplazamientos entre zonas de análisis de transporte para lograr la distribución de los viajes en un área. (Ortuzar & Willumsen, 2011) El presente capítulo expone las características principales de la información de demanda de transporte existente para el área metropolitana de Bucaramanga

#### **4.1.2.1. Información secundaria disponible de las zonas de análisis de transporte base del área metropolitana de Bucaramanga**

Como punto de partida para la definición de las zonas de análisis de transporte del área metropolitana de Bucaramanga, se tomó la información base derivada de la definición de 129 zonas que conforman los puntos atractores y generadores de viajes de la red vial definida para el año 2010, las cuales se establecieron de acuerdo con las zonas censales determinadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) en el año 2005. La zonificación existente contenía una serie de atributos que permitieron la identificación de cada zona, entre los cuales se incluyó el área, perímetro, población promedio, un código identificador y el total de viajes generados por cada una de ellas de acuerdo con la información contenida en las matrices Origen-Destino contempladas para el mismo estudio de referencia. (UIS, 2010)

#### **4.1.2.2. Información secundaria disponible de la matriz semilla del área metropolitana de Bucaramanga**

Las matrices semilla tomadas para el desarrollo de la investigación, corresponden a las elaboradas por la Universidad Industrial de Santander en el año 2010, las cuales son matrices de viajes muestrales que representaban la tendencia de movilidad de los usuarios en la hora punta de tráfico en el área metropolitana de Bucaramanga, y se asocian a los modos de transporte privado, público y de carga.

La matriz de transporte privado fue elaborada a partir de las encuestas domiciliarias realizadas en el año 2005, las cuales registraron la cantidad y características de los viajes en el área metropolitana por modo, frecuencia, transbordo entre otros, y contemplaba información de los orígenes y destino de los viajes para 129 zonas de transporte en la ciudad. Esta información fue complementada y actualizada con base en la información tomada en el inventario de tráfico realizado por la UIS para la elaboración de los PMM del área metropolitana de Bucaramanga (UIS, 2010), información que fue integrada en la base de datos de la red, a partir de la cual se realizó una actualización de la matriz usando el algoritmo desarrollado por Nielsen para reasignaciones de flujos. (UIS, 2010)

La matriz de viajes asociados al transporte público fue actualizada con base en información tomada para un conjunto de rutas y paraderos representativos dentro de la red de transporte público de los municipios, la cual incluyó levantamientos de información de ocupación visual y subida y bajada de pasajeros. Con base en la información levantada se actualizó la matriz generada en el año 2003, aplicando el algoritmo de Nielsen, de la misma forma que para la matriz de transporte privado. La matriz de viajes del transporte de carga fue generada a partir de la técnica de generación de matriz sintética, con base en la cual se estableció una matriz que fue actualizada con base en la información de volúmenes de vehículos de carga tomada en los informes realizados. (UIS, 2010)

Como resultado, las matrices base para la estimación de la demanda de tráfico en el área metropolitana fueron tomadas de la actualización realizada en el año 2009, en donde como resultado se obtuvieron matrices cuadradas de 129x129, de acuerdo con las zonas de análisis de transporte (ZAT) establecidas. La matriz asociada al transporte privado estimó un aproximado de 40.000 viajes/hora punta, la matriz de transporte público relaciona un aproximado de 49.000

viajes-hora punta y la matriz de transporte de carga considera un total de aproximadamente 5.100 viajes-hora punta.

#### **4.1.2.3. Actualización de las zonas de análisis de transporte definidas para el modelo de simulación.**

Teniendo como referencia la información base existente en formato SHAPE de las zonas de transporte del área metropolitana de Bucaramanga, se procedió a realizar una revisión exhaustiva de la información georreferenciada propuesta en estudios anteriores, verificando principalmente la coherencia en la ubicación espacial de los polígonos definidos y sus atributos asignados como el sector (SECTOR), municipio (MPIO) y departamento (DPTO) al cual pertenecen las zonas existentes, así como los valores asociados de identificación (ID) y área (AREA\_M2 – AREA\_HA).

Considerando que la zonificación base fue estructurada basándose en la información registrada por el DANE para el año 2005, se procedió a realizar una comparación respecto a la información registrada por el DANE en el año 2012 y 2018, en donde se evidenció que, si bien las zonas originales corresponden a las relacionadas por el DANE, su ubicación, escala y cantidad, no corresponden en su totalidad. Se identificó que la principal diferencia entre la información analizada es el número de zonas existentes en los diferentes archivos y asignadas a cada uno de los municipios del área metropolitana. Adicionalmente, para la información base, se encontraron diferencias en la ubicación geoespacial y en la escala asignada a los polígonos.

La diferencia encontrada en la cantidad de zonas registradas por el DANE para los años 2005, 2012 y 2018, es coherente con el crecimiento urbano que se ha dado en el AMB, lo cual generó la asignación de nuevas zonas con el propósito de incluir los nuevos desarrollos. Para el caso de la información base, la selección se dio con base en la capacidad de cada zona para atraer

o generar viajes, y considerando que algunas de las zonas existentes no contenían vías de conexión, estas no fueron consideradas dentro del análisis. En la *Tabla 19* se presenta las principales diferencias encontradas en la asignación de zonas de los archivos estudiados.

**Tabla 19**

*Información contenida en los archivos de referencia.*

| Nombre del archivo              | Año  | Número total de zonas | Numero zonas por municipio    | Fuente    |
|---------------------------------|------|-----------------------|-------------------------------|-----------|
| <b>Zonas_AMB_2005.shp</b>       | 2005 | 137                   | B=97<br>F=16<br>G=14<br>P=10  | DANE      |
| <b>Zonas_AMB_2012.shp</b>       | 2012 | 139                   | B=97<br>F=16<br>G=15<br>P=11  | DANE      |
| <b>Zonas_AMB_2018.shp</b>       | 2018 | 173                   | B=101<br>F=26<br>G=20<br>P=26 | DANE      |
| <b>Zonas_originales_AMB.shp</b> | 2009 | 130                   | B=96<br>F=14<br>G=11<br>P=9   | Geomática |

*Nota. Las siglas presentadas en la tabla corresponden a: Bucaramanga (B), Floridablanca (F), Girón (G) y Piedecuesta (P).*

*Fuente: elaboración propia.*

Habiendo identificado estas diferencias y considerando que los parámetros asignados a los diferentes SHP de zonificación no difieren entre sí, se procedió a migrar la información de viajes (número de viajes atraídos y generados por zona) desde la zonificación base a la zonificación DANE 2005, con el propósito de subsanar las inconsistencias existentes en la georreferenciación y escala de la información base.

Con la zonificación base correctamente georreferenciada, se procedió a actualizar la información a la disponible para el año 2018 con el propósito de restablecer la información de los trazados geométricos de las zonas a los más recientes disponibles y analizar las nuevas zonas consideradas por el DANE para el área metropolitana.

Las zonas adicionales existentes en la información DANE para la actualización realizada al año 2018, no fueron consideradas en la presente investigación, ya que con base en el análisis espacial realizado se pudo concluir que las zonas adicionales no contienen conexiones viales que aporten información al modelo de transporte, y ya que no poseen información de viajes asignada y no fueron consideradas para la construcción de la matriz base del estudio, no son de interés para la investigación.

#### **4.1.2.4. Actualización de la demanda definida para el modelo de simulación**

La información de demanda del área metropolitana de Bucaramanga requirió un ajuste orientado a obtener una mejor representación de las condiciones de movilidad de los Municipios para el año de estudio. Considerando que la actualización de la información relacionada con matrices de viajes Origen-Destino (OD) requiere de esfuerzos considerables en términos de organización, personal y costos; a través del tiempo se han desarrollado metodologías alternas que permiten realizar actualizaciones basadas en la estimación de la variación en los flujos OD a través de diferentes fuentes de información. (García-Ródenas & Verastegui-Rayo, 2013); (Benitez, Romero, Caceres, & Del Castillo, 2013); (Noriega & Florian, 2009); (Codina & Barceló, 2004); (Cascetta, 2001) citado por (Aimsun 20.1, 2017). A continuación, se presenta el proceso que se ejecutó para llevar a cabo la actualización de la demanda:

- Revisión bibliográfica.

El proceso de ajuste de las matrices de viajes se ha abordado a lo largo de los años, por lo cual existen métodos variados que buscan obtener magnitudes de viajes observadas ajustadas con un error controlado, a partir de la información base y la asignación de un modelo de red. La actualización de las matrices comúnmente se realiza con base en una matriz anterior, la cual generalmente se deriva de encuestas que se someten a diferentes correcciones, expansiones y validaciones para finalmente obtener matrices confiables y representativas para la zona en estudio, las cuales se consideran buenas aproximaciones de la matriz OD a estimar y que usualmente pueden ajustarse con información adicional como volúmenes, viajes y/o velocidades, derivada de levantamientos de información de campo tradicionales y de otras tecnologías de vigilancia de tráfico más recientes. (Benitez et al., 2013)

Los métodos más recientes para la actualización de matrices están orientados a modelos de asignación de tráfico dinámico para aplicaciones de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS por sus siglas en inglés), los cuales se basan en la posibilidad de tener información de tráfico en tiempo real, la información de matrices previas y cualquier información sobre la estructura de la demanda que pueda ser útil para solucionar el problema. (Cipriani et al., 2014) Para los modelos de tráfico dinámico que estiman el estado actual del tráfico y predicen su evolución en el corto plazo, es necesario contar con la estimación de matrices OD dinámicas, las cuales requieren de una alimentación continua de información. (J Barceló, Montero, Marqués, & Carmona, 2010)

Si bien el modelo que se busca obtener está orientado a la evaluación del tráfico de la ciudad con base en una asignación dinámica, la actualización de la matriz se consideró efectuando una asignación y ajuste estático, ya que los datos con los que se cuenta son representativos de un intervalo de tiempo específico, y los municipios objeto de estudio carecen de un seguimiento en

tiempo real de las condiciones de tráfico que permitan la predicción en tiempo real de matrices OD dinámicas, por lo cual no es posible contar con información que nos permita estimar matrices dependientes de tiempo,

Por tanto, la estimación de la matriz de viajes OD actualizada se realizó mediante un método de ajuste OD estático basado en el método de optimización de dos niveles propuesto por Florian & Chen (1995) y Codina & Barceló (2004), el cual se aplicó a través de las herramientas disponibles en el software de modelación de transporte Aimsun Next, el cual realiza el cálculo de una secuencia de matrices OD orientada a disminuir el error de mínimos cuadrados, a través de una comparación entre los recuentos de tráfico y los flujos obtenidos a partir de la asignación de tráfico realizada. (Aimsun 20.1, 2017). Según Shafiei, Nazemi, & Seyedabrishami (2015) el método de optimización de dos niveles se compone de un nivel superior que estima la matriz de viajes y uno inferior que realiza la asignación de equilibrio en la red que se está estudiando.

- Ejecución de un modelo de simulación de referencia previo al proceso de ajuste

Para ejecutar el método de ajuste seleccionado fue necesario contar con un modelo de simulación de referencia que contemplara la red de carreteras y las 129 zonas de transporte actualizadas, 188 puntos de recuentos de tráfico que contenían información de volúmenes vehiculares en la hora pico de tráfico en los Municipios y la demanda base de vehículos correspondiente a la matriz semilla de viajes sin actualizar. Con base en esta información se procedió a realizar un ejercicio de modelación inicial para estudiar la variación en el comportamiento de la demanda base considerando los métodos de asignación estática Todo o Nada (ToN) y Frank and Wolfe (F&W), con el propósito de identificar las diferencias entre la información consignada en la matriz semilla de viajes y la información actualizada por medio de los conteos de tráfico. Con base en el resultado de esta asignación, fue posible obtener una

comparación entre la distribución de la demanda inicial dada por la matriz de viajes base, y la información actual de los conteos de flujos vehiculares disponibles para el estudio.

Los métodos de asignación seleccionados para este primer ejercicio buscaban dar a conocer las condiciones del tráfico en la ciudad considerando diferentes escenarios, por ejemplo, con el método ToN se buscó tener una referencia del comportamiento del tráfico en la ciudad suponiendo que no existen efectos de congestión y que todos los conductores tienen las mismas preferencias al seleccionar sus rutas. (Ortúzar & Willumsen, 2011) La asignación por el método F&W se utilizó con el propósito de calcular los flujos de acuerdo con el principio de equilibrio de Wardrop, en el cual ningún usuario puede mejorar su tiempo de viaje cambiando de ruta (Aimsun 20.1, 2017), es decir que en las redes congestionadas es posible organizar el tráfico de tal forma que ningún viajero puede reducir los costos asociados a la ruta seleccionada, tomando una alterna. (Ortúzar & Willumsen, 2011)

Este primer ejercicio permitió identificar el grado de desactualización de la información de viajes derivada de la matriz base, a partir de lo cual se procedió a realizar la actualización de la matriz, usando igualmente los métodos establecidos como referencia ToN y F&W, con el fin de poder realizar una comparación entre el comportamiento de la demanda para las dos diferentes distribuciones.

- Ejecución del método de ajuste OD

El ajuste OD de matrices, puede hacer coincidir libremente los valores de la matriz de demanda con los recuentos de tráfico observados, sin embargo, distorsionar en exceso los datos de la matriz para lograr una aproximación a los flujos no es recomendable, ya que se perdería el esfuerzo realizado en la conformación de la matriz semilla para definir la distribución y magnitud de los viajes de la zona de estudio. (Benitez et al., 2013) (Shafiei, Nazemi, & Seyedabrishami,

2015) Por tal razón fue necesario controlar el ajuste esperado para la matriz por medio de los parámetros de elasticidad de la demanda y de la distribución de la demanda, los cuales controlan la variación permitida entre la matriz ajustada y su distribución de longitud de viaje, respecto a la matriz y distribución original. (Aimsun 20.1, 2017)

Establecer un valor formal de elasticidad de la demanda requiere de la disponibilidad de información histórica de variables como velocidad, volúmenes vehiculares, costos, capacidades, entre otras. (Blainey & Preston, 2019) Debido a la ausencia de datos de series de tiempo para muchas de las variables requeridas, se determinó que estimar un valor de elasticidad específico para el proceso de ajuste de la matriz del área metropolitana no era posible, por tal razón, se realizó una revisión de literatura para identificar valores de referencia que pudieran ser implementados para efectuar el ajuste. Adicionalmente se analizó la información disponible como lo volúmenes vehiculares históricos y el crecimiento del número de viviendas en el área de estudio.

Muchos de los autores concuerdan en que es usual que el valor de la elasticidad de la demanda de transporte urbano oscile entre 0.1 y 0.5. Autores como Islas, Rivera, & Torres (2002), estiman que la elasticidad en el transporte urbano puede tomar valores en el corto plazo de entre 0.1 y 0.4 en el corto plazo, y de 0.5 en el largo plazo. Escobar, Parra, Marín, Bolaños, & Martínez (2020), encontraron en su estudio valores de elasticidad cercanos a 0.5, acorde con lo propuesto por De Rus, Campos, & Nombela (2003) quienes señalaron que la elasticidad en la demanda del transporte urbano oscila entre 0.3 y 0.5. El ejercicio realizado por Agosta, Martínez, Roca, & Albrieu (n.d.) arrojó valores de elasticidad promedio de 0.33, coincidiendo por lo establecido por Vuchic (2005), quien estableció que la elasticidad puede variar entre 0.21 y 0.48.

Respecto a la dinámica en el desarrollo urbano de área de estudio, se encontró que existió en promedio un crecimiento anual en el número total de viviendas de entre 3 a 5%, obtenido de

esta forma un crecimiento aproximado de 50% en los últimos 10 años.(Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2020) Respecto a la dinámica de movilidad del área de estudio, Abreo (2018) identificó fuertes variaciones en la dinámica de movilidad del área metropolitana, encontrando que la hora punta de tráfico para el año 2009 se daba sobre el medio día, y para el año 2017 el periodo de máxima demanda correspondía al flujo existente entre las 05:30 y las 06:30 de la tarde.

De acuerdo a la información disponible y con el propósito de encontrar un punto medio para la ejecución del ajuste de la matriz, se estableció como valor de elasticidad 0,5. Este valor se estimó luego de haber realizado pruebas preliminares con diferentes valores, de acuerdo a lo consultado en bibliografía y con el propósito de tener en cuenta las fuertes variaciones poblacionales y de movilidad identificadas, sin llegar a distorsionar en su totalidad la distribución y magnitud de los viajes definidos en la matriz semilla. Se hace la salvedad que el valor seleccionado corresponde a un valor de referencia que resulta práctico para la ejecución del ajuste buscado, sin embargo, se resalta la importancia de adelantar estudios que permitan calcular un valor de elasticidad de la demanda acorde con la situación real del área metropolitana.

Una vez se obtuvo los insumos necesarios para la ejecución del ajuste, se obtuvo una matriz de viajes OD actualizada, la cual se segmentó en periodos de demanda más cortos, generando un conjunto de matrices que cubrían intervalos de tiempo más breves, los cuales en conjunto representaban la demanda total durante el periodo modelando. Se perfiló la demanda obtenida con el propósito de lograr reproducir en una asignación dinámica, con los perfiles de los flujos de tráfico que se tienen como referencia. (Aimsun 20.1, 2017)

#### **4.1.2.5. Levantamiento de Información actualizada para el ajuste, validación y calibración del modelo de simulación**

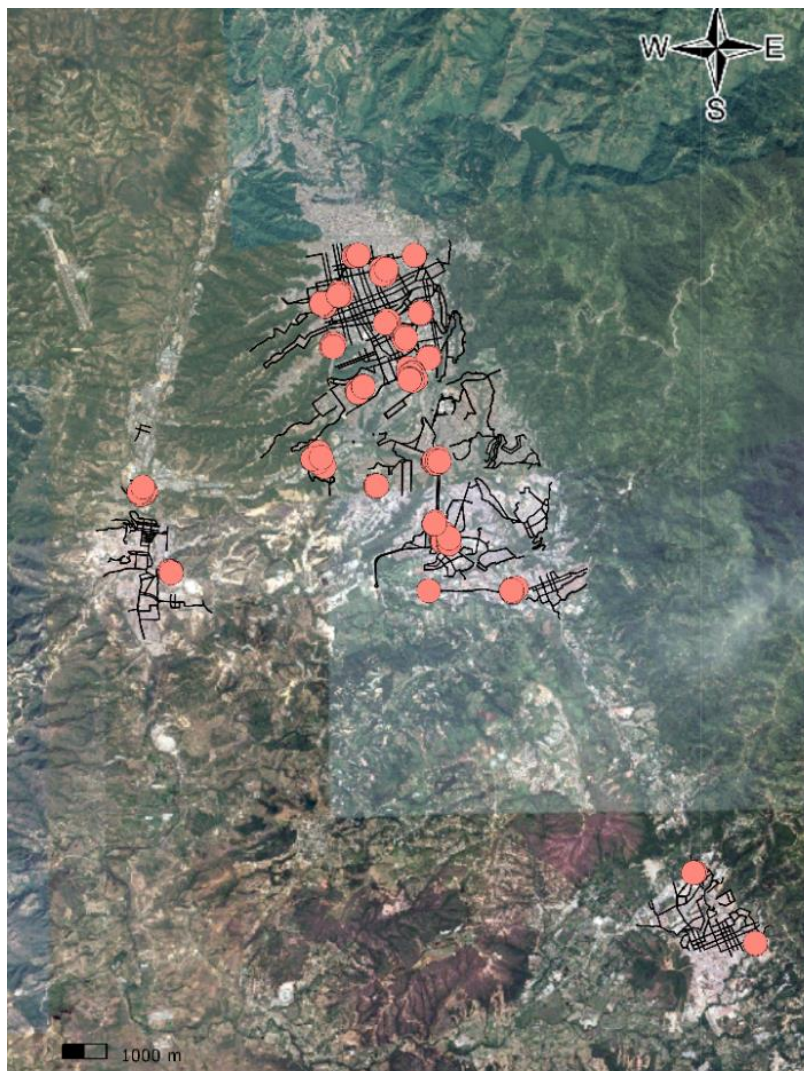
Dentro del ejercicio de actualización de la demanda realizada en la presente investigación, se realizó el levantamiento de información primaria, la cual fue el insumo base para realizar la actualización del modelo, de la misma forma que hizo parte de la validación y calibración del modelo desarrollado. La información levantada corresponde a la toma de volúmenes de tráfico en las principales intersecciones del área metropolitana, así como mediciones de velocidad realizadas sobre los corredores con el tráfico más representativo de los municipios.

- Aforos vehiculares de referencia.

El levantamiento de información realizado contempló el aforo de 23 intersecciones en el área metropolitana, las cuales se traducen en 188 puntos de recuentos de flujos en diferentes segmentos de la red del área metropolitana. Cada punto contó con información de flujos vehiculares en intervalos de entre 45 y 60 minutos asociados a la hora punta del tráfico de la ciudad, presentando la información en intervalos de 15 minutos. En la *Figura 31*, se puede observar los detectores ubicados en el modelo de simulación.

**Figura 31**

*Puntos de recuentos de flujo en los segmentos de red del área metropolitana de Bucaramanga.*



*Nota. Elaboración propia con base en software Aimsun.*

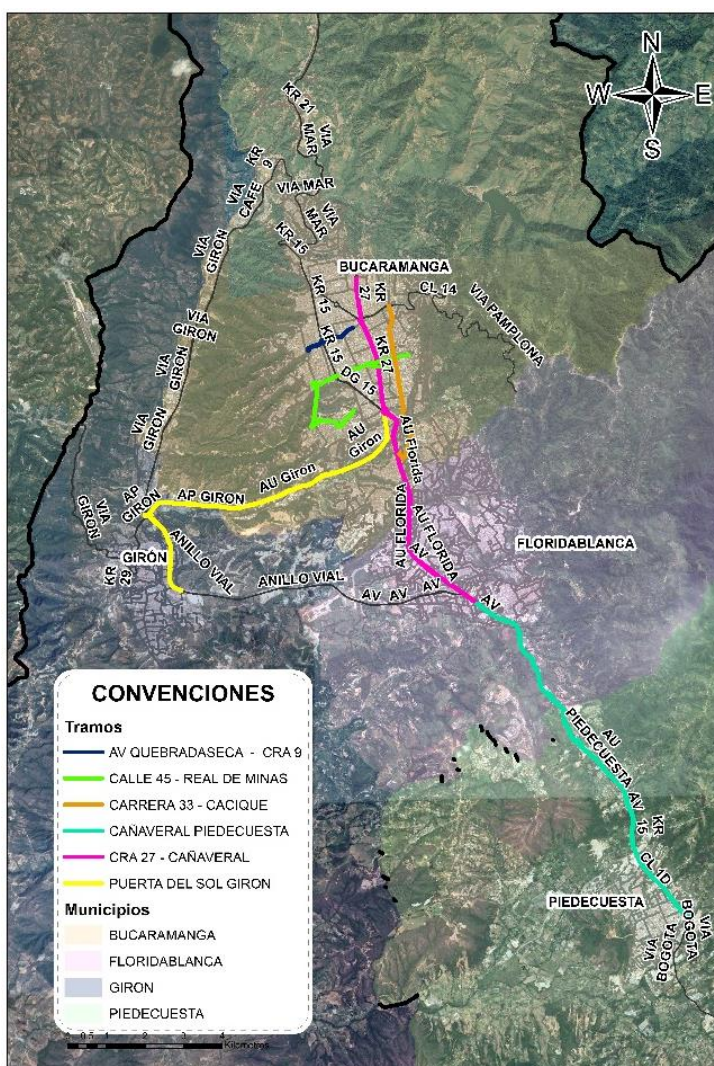
Con el objetivo de validar si los recuentos disponibles brindaban información relevante sobre el tráfico en la red, se realizó una evaluación con la herramienta integrada al software Aimsun, la cual permitió validar en qué medida los puntos disponibles con información de tráfico abarcaban el total de la demanda, esto permitió obtener el porcentaje de viajes contenidos en la configuración propuesta. (Aimsun 20.1, 2017)

- Levantamiento de velocidades

La medición de velocidades en los principales corredores de conexión del área metropolitana, fueron realizadas por medio del método de vehículo flotante para 6 corredores, los cuales pueden observarse en la *Figura 32*.

### Figura 32

*Principales corredores usados para la medición de velocidades en el área metropolitana de Bucaramanga.*



*Nota. Elaboración propia.*

## **4.2. Construcción del modelo de simulación para el área metropolitana de Bucaramanga**

El modelo de simulación construido buscó estimar los impactos o beneficios derivados del suministro de información a los conductores del área metropolitana, construyendo en primera medida un modelo que representa las condiciones normales de movilidad del área de estudio. A continuación, se presenta los pasos efectuados para la construcción del modelo de simulación realizado.

### ***4.2.1. Montaje de un modelo dinámico en un entorno de simulación mesoscópico***

El modelo de simulación implementado incluyó la red urbana simplificada de los 4 municipios que conforman el área metropolitana de Bucaramanga, se buscó representar las condiciones de movilidad derivadas de las elecciones realizadas por los conductores en un día típico en el periodo de mayor demanda, lo cual representó un reto para la modelación ya que existen áreas con altos niveles de congestión debido a la fuerte demanda que experimentan algunos corredores e intersecciones de conexión municipal.

#### **4.2.1.1. Selección de la herramienta de simulación.**

Con base en lo anterior, se identificó la necesidad de una herramienta de simulación que además de representar la interacción entre la oferta y la demanda del área de estudio, permitiera la implementación de condiciones de incidente en el modelo, la simulación de la respuesta de los conductores al incidente y el impacto de la difusión de la información en la red. La determinación de las necesidades de simulación permitió seleccionar a Aimsun como herramienta de simulación, considerando que integra modelos microscópicos, mesoscópico, macroscópicos, e híbridos en una sola herramienta, utilizando diversos algoritmos de elección de ruta que incluyen asignación estática y dinámica y permite representar el suministro de información a los conductores. A

continuación, se presenta las principales consideraciones establecidas para el desarrollo del modelo de simulación.

#### **4.2.1.2. Selección la escala de simulación**

Con el objetivo de evaluar la escala requerida para la simulación se encontró que la microsimulación de tráfico evidencia ventajas en la modelación individual del comportamiento del conductor, de forma que pueden conocerse en detalle los tiempos, velocidades y elecciones de carril en un periodo de tiempo determinado. Sin embargo, se encontró que la complejidad de la lógica de la simulación, el número de parámetros que deben calibrarse, la complejidad de la red y el tiempo de proceso requerido, dificulta el uso de estos simuladores en redes de tamaño grande o moderado (Florian, Mahut, & Tremblay, 2001; Sundaram et al., 2011) Posteriormente se evaluó la implementación de un modelo macroscópico, se encontró que al ser un modelo simplificado que considera retrasos y capacidades, no representa de forma adecuada la propagación teórica de las colas y la evolución de la congestión a lo largo del tiempo (Aimsun 20.1, 2017) .

Por otro lado, los modelos mesoscópicos consideran el comportamiento de seguimiento de automóvil, así como de cambio de carril, sin embargo, no necesariamente localizan los vehículos en los enlaces de la red, es decir los vehículos se consideran al entrar o salir de una sección de carretera, pero no simula el movimiento intermedio. La simulación a escala mesoscópica es un modo intermedio de simulación logrando abordar con menor detalle la evolución del tráfico en una red de tamaño considerable, obteniendo resultados con mayor rapidez y con buenas representaciones. (Florian et al., 2001; Aimsun 20.1, 2017)

#### **4.2.1.3. Selección del método de asignación para la simulación**

Habiendo identificado la escala de simulación se procedió a seleccionar un método de asignación que permitiera integrar el modelo de demanda y de oferta, de forma que permitiera representar la dinámica del tráfico y reproducir las condiciones de congestión en la red. En primera medida se consideraron métodos de planificación tradicionales como la modelación estática, sin embargo, se encontró que estos consideran la distribución de la demanda de forma uniforme en un intervalo de tiempo de fijo, esta concepción no representa en realidad las dinámicas de la congestión del tráfico, lo cual no permite obtener resultados precisos del rendimiento de la red en el corto plazo.

Ya que el presente modelo buscó evaluar la aplicación de tecnologías ATIS en el mejoramiento de la redistribución de flujos en una ciudad, fue necesario involucrar modelos que capturen la dinámica del tráfico de forma realista al modelar corredores congestionados debido a la incidencia de accidentes, así como la actualización de las rutas OD y el suministro de información tráfico. (Sundaram et al., 2011). Para tal fin se determinó que se requiere de la implementación de una asignación dinámica de tráfico (DTA), ya que estos modelos son capaces de representar los fenómenos de tráfico como las colas, la interacción entre los vehículos, así como la implementación de incidentes y políticas para la evaluación de la red. (Kostic, Meschini, & Gentile, 2017) A continuación se presentan las principales características del método de asignación seleccionado.

Las simulaciones basadas en simulación DTA en el contexto de la planificación están en capacidad de estimar y predecir condiciones de red, lo cual permite ubicar y medir los impactos de la congestión, así como su disipación y la acumulación de colas, capturando las variaciones

temporales y espaciales en las redes. También es posible incorporar al análisis los efectos de los cambios operacionales de la red, los semáforos y la simulación de sistemas y estrategias de los ITS en particular lo relacionado con las ATIS. (Peeta & Ziliaskopoulos, 2001; Sundaram et al., 2011; Kamga, Mouskos, & Paaswell, 2011)

La asignación DTA ha sido ampliamente utilizada en varios campos de aplicación como en planeación operativa, análisis de proyectos y políticas, evaluaciones de impacto, determinación de costos por congestión, monitoreo y gestión de redes de tráfico. (Shafiei et al., 2015) En lo relacionado a aplicaciones ATIS su uso se divide en dos modos principales, las aplicaciones en línea que permiten la modelación en tiempo real para monitorear y gestionar el tráfico desde centros o sistemas de control, y las aplicaciones fuera de línea las cuales son usadas para probar y evaluar medidas relacionadas con ITS que se buscan implementar en la práctica. (Florian et al., 2001) Se busca que la aplicación de los modelos sea en redes suficientemente grandes de forma que sea posible estudiar los efectos directos e indirectos de las estrategias de manejo que se busca evaluar. (Kamga et al., 2011)

La asignación DTA es el proceso que determina la forma en que interactúa el modelo de demanda que estima y predice las decisiones de los conductores estimando los flujos OD, determinando las velocidades del flujo en ruta las cuales varían con el tiempo; y el modelo de oferta como método de carga a la red que simula la interacción entre la demanda y la red permitiendo la determinación de los tiempos de viaje, las longitudes de cola y los flujos variables en el tiempo. Es así como se establece el supuesto de que todos los viajeros para efectuar sus desplazamientos intentan minimizar sus tiempos de viaje individuales, seleccionando las rutas que perciben más cortas de acuerdo con las condiciones del tráfico existentes. (Florian et al., 2001; Ben-Akiva et al., 2012; Aimsun 20.1, 2017)

La asignación dinámica de tráfico se enfoca en determinar la forma en que se distribuyen los flujos de enlace o rutas en la red a través del tiempo, de acuerdo con la elección de ruta disponibles para los usuarios. (Mahmassani, 2001) La selección de ruta busca representar un modelo del comportamiento del usuario que establece los criterios más probables empleados por los conductores para definir un conjunto de rutas calculando la probabilidad de cada ruta disponible, para posteriormente modelar la decisión del conductor seleccionando una ruta de acuerdo a la utilidad percibida por el usuario definida en términos de tiempo de viaje percibido, longitud de ruta, condiciones de tráfico esperadas entre otros factores. (Jaime Barceló & Casas, 2006)

#### **4.2.1.4. Selección del método de elección de ruta**

Existen múltiples y variados métodos de elección de ruta, algunos de ellos son llamados métodos deterministas basados en la ruta más corta, otros son técnicas estocásticas basadas en la selección de la ruta más corta, otros incluyen algoritmos de enumeración restringidos y por último los enfoques probabilísticos. (Prato, 2009) Una revisión detallada sobre los diferentes enfoques de modelado de elección ruta pueden consultarse en Prashker & Bekhor (2004) y Prato (2009). Los modelos de asignación dinámica estudiados en la presente investigación se orientan al desarrollo de una simulación mesoscópica, se han seleccionado dos enfoques diferentes para la ejecución de la asignación de acuerdo con los métodos disponibles en la herramienta de simulación seleccionada. El primero enfoque que usa modelos de elección de ruta estocástica (SRC por sus siglas en inglés) y el segundo basado en el principio del Equilibrio Dinámico del Usuario (DUE por sus siglas en inglés). (Aimsun 20.1, 2017)

- Modelos de elección de ruta estocástica

Los modelos de elección de ruta estocástica se enfocan en la teoría de elección discreta u otros enfoques probabilísticos que han demostrado que solo un pequeño porcentaje de los viajeros elige la distancia, tiempos o costos mínimos de ruta, por lo cual no es posible garantizar la optimización total de la red, en este caso los algoritmos prevén la optimización de las decisiones de ruta basándose en la información disponible. (Ben-Akiva et al., 2012; (Aimsun 20.1, 2017)

Existen diferentes métodos disponibles para abordar el problema de optimización mencionado, algunos de los más estudiados son el modelo binomial el cual controla la selección de ruta para todos los posibles pares origen-Destino, el modelo Proporcional se basa en una probabilidad de elección de rutas alternativas basada en un valor alfa inversamente proporcional a los costos asociados a la ruta y el modelo Logita Multinomial que busca ajustar el efecto que pequeños cambios en los tiempos de viaje pueden tener en las decisiones del conductor. (Aimsun 20.1, 2017) Este último es un modelo ampliamente estudiado en la literatura y con la cuenta con una gran variedad de modificaciones que buscan optimizar el método teniendo en cuenta la superposición entre rutas manteniendo la manejabilidad analítica de la clase de funciones de tipo logit. (Prato, 2009)

- Modelos de equilibrio dinámico del usuario.

El enfoque de equilibrio dinámico del usuario propone que para llegar al equilibrio se adopte la perspectiva desde la cual las elecciones de ruta y hora de salida por parte de los conductores se realizan de forma variable y racional, y estas elecciones solo se consideraran racionales si se equilibran las desutilidades de las diferentes alternativas. (Jaime Barceló & Casas, 2006) La asignación DUE establece suposiciones sobre el comportamiento de elección de ruta de los usuarios con base en el Principio de Equilibrio Dinámico del Usuario propuesto por Ran y

Boyce 1996, formulando la versión dinámica del equilibrio del usuario de Wardrop, proponiendo dos premisas fundamentales: primero, para cada par Origen-Destino en cada instante, los tiempos reales de viaje experimentados por los conductores que salen en el mismo instante de tiempo son iguales y mínimos; segundo, el tráfico dinámico del flujo sobre la red está en un estado de equilibrio dinámico de usuario basado en el tiempo de viaje. (Aimsun 20.1, 2017)

Los enfoques propuestos para DUE se basan en procedimientos de simulación de carga de la red que son de naturaleza heurística, por lo que no se puede proporcionar ninguna prueba formal de convergencia, sin embargo, puede determinarse empíricamente si la solución se ha interpretado en términos de una DUE, en el sentido de que "los tiempos de viaje actuales experimentado por los viajeros que salen al mismo tiempo son iguales y mínimos". Una implementación computacional eficiente de este enfoque conceptual requiere que el cálculo y la selección del camino, se implemente independientemente del proceso de carga de red dinámico. (Aimsun 20.1, 2017)

Los modelos de elección de ruta asociados al DUE, se definen según el tipo de algoritmos utilizados entre los cuales existe una variedad de algoritmos de proyección, métodos de alternancia de dirección, y uno de los métodos comúnmente usado, el método de promedio sucesivos (MSA), el cual redistribuye los flujos entre las rutas disponibles en un procedimiento iterativo, calculando una nueva ruta más corta considerando los orígenes y destinos en cierto intervalo. Así mismo, este último método cuenta con diferentes modificaciones que buscan mantener el control sobre el número de rutas generadas por el algoritmo en caso de manejar grandes redes, en donde se requiere establecer un número definido de iteraciones para los pares Origen-Destino y el intervalo de tiempo de la modelación. (Mahut, Florian, & Tremblay, 2002; Aimsun 20.1, 2017)

- Comparación de los métodos de elección de ruta

Con base en la revisión bibliográfica realizada, los esfuerzos en la selección de los modelos de asignación de ruta se limitaron a los enfoques de elección más comúnmente usados en la literatura, tanto para el enfoque SRC como para el DUE. A continuación, se presenta un cuadro comparativo que presenta las principales ventajas y desventajas de la aplicación de los métodos, con el objetivo de definir el algoritmo de asignación más adecuado para el desarrollo del modelo de simulación propuesto.

**Tabla 20**

*Comparación de métodos de asignación de ruta para la implementación en el modelo de simulación*

| <b>Modelo C-Logit (SRC)</b>   | <b>Modelo MSA (DUE)</b>   |
|---|---|
| <p>Como se mencionó, el modelo Logit Multinomial se han aplicado exitosamente en varios modelos de red, y cuentan con características deseables que incluye una fórmula cerrada para calcular la probabilidad de elección de ruta entre un conjunto conocido de rutas para el uso de un vehículo individual, al mismo tiempo que permite procedimiento de calibración eficientes. Sin embargo, debido a que en algunas aplicaciones se evidenció en los resultados congestión excesiva, velocidades cercanas a cero y poco flujo, se realizaron estudios más detallados que identificaron una limitación crítica en el supuesto de los términos del error, encontrando que se distribuyen de forma idéntica e independiente, lo cual no es suposición válida para una red urbana, ya que se genera una superposición en los caminos alternativos. (Ben-Akiva et al., 2012); <b>(Chen, Pravinongvuth, Xu, &amp; Ryu, 2012)</b></p> | <p>La implementación de modelos DUE parte del supuesto de que todos los conductores tienen acceso perfecto a la información, conociendo todos los tiempos de viaje de todos los caminos disponibles, por lo cual realizan su elección intentando minimizar sus propios tiempos de viaje. Es así como se establecen algoritmos de solución en forma de procesos iterativos diseñados para converger en estas condiciones. (Mahut et al., 2002)</p> <p>El método de promedios sucesivos calcula en primer lugar las rutas dinámicas más cortas en función de los tiempos de viaje a flujo libre y los flujos iniciales, redistribuyendo los flujos en la red. Posteriormente con base en este primer cálculo nuevamente se calcula la ruta más corta con base en las condiciones prevalecientes en la red y redistribuyendo los flujos. De esta forma continuarán las iteraciones hasta llegar a un número máximo especificado. No es posible</p> |

---

Como conclusión se encontró que puede existir una sobreproducción de las probabilidades de elegir caminos que contengan enlaces a vías importantes, lo que puede generar una congestión que no corresponde con la realidad. (Ben-Akiva et al., 2012); **(Zhou, Chen, & Bekhor, 2014)**

Con el objetivo de mejorar las imperfecciones encontradas en el modelo Logit Multinomial, se buscaron diferentes metodologías y enfoques para agregar un término de corrección a la función de utilidad, de forma que fuera posible aprovechar la simplicidad del modelo y continuar con su aplicación a redes reales. Uno de los enfoques más usados es el denominado C-Logit, el cual superó el problema de superposición agregando un factor de corrección al modelo que permite a la función capturar el grado de similitud entre las alternativas del conjunto de opciones. (Ben-Akiva et al., 2012)

Algunas de las aplicaciones más importantes del método se evidencian en la estimación de flujos para matrices OD a partir de conteos de tráfico, diferentes modelos de simulación, y en problemas de diseños de red. (Ben-Akiva et al., 2012) Se encontró que el modelo C-Logit brinda robustez a las estimaciones de los parámetros de utilidad considerando el tamaño de las rutas disponibles y genera una formulación matemática equivalente para la solución de problemas SRC. (Prato, 2009) Así mismo algunas de sus principales ventajas incluyen flujos de tráfico y distribuciones de densidades más realistas en la red, esfuerzos de calibración bajos, comportamiento racional sólido, entre otros. (Zhou et al., 2014)

En cuanto a las desventajas evidenciadas para el modelo, (Prato, 2009) menciona que

establecer una prueba sobre la convergencia del método ya que el mapa de carga de red no tiene forma analítica, sin embargo, es posible usar una medida de brecha relativa para calificar la solución dada, de forma similar a los modelos de equilibrio estáticos. (Mahut et al., 2002); (Kamga et al., 2011); Aimsun 20.1, 2017)

La principal deficiencia asociada a estos modelos se asocia a los inconvenientes computacionales relacionados con su implementación, debido al creciente número de rutas en casos de aplicación de redes grandes. (Aimsun 20.1, 2017) Con el propósito de mantener el control sobre el número de rutas en los algoritmos MSA se han propuesto diferentes modificaciones del algoritmo como las propuestas, siendo uno de los más eficientes el implementado por (Mahut et al., 2002). (Aimsun 20.1, 2017)

Se ha encontrado que una de las deficiencias más importantes de los métodos DUE, es el propio supuesto de que cada viajero conoce perfectamente las condiciones de la red, y con base en ello selecciona una ruta que permite minimizar su costo de viaje. Sin embargo, esta suposición no es realista en la práctica. (Zhou et al., 2014)

---

“el factor de comunalidad captura solo una parte de la similitud y no se sugieren reglas de selección para la formulación de los factores de comunalidad”.

---

*Nota. Elaboración propia con base en la literatura relacionada.*

- Selección final de método de elección de ruta:

Considerando que el DUE propone un modelos de elección de ruta simple que asume de manera poco realista que los usuarios tiene un conocimiento perfecto de los costos de las rutas y que realizan su selección con el objetivo de minimizar sus costos de viaje (Prato, 2009), se seleccionó como modelo de asignación de ruta el enfoque SRC ya que este método realiza una distinción entre el costo de viaje que perciben los individuos y el costo de viaje real, asumiendo razonablemente que los viajes poseen información imperfecta sobre los costos de ruta, estableciendo un principio de equilibrio en el cual ningún viajero puede mejorar el costo de viaje percibido cambiando su ruta unilateralmente. (Zhou et al., 2014)

Adicionalmente autores como Sundaram et al. (2011), han evidenciado beneficios en la implementación del método SRC ya que estos modelos pueden representar condiciones atípicas como accidentes que están presentes en las redes, cuyos impactos pueden ser tratados por medio de ATIS, ofreciendo coherencia en los resultados de los modelos a corto plazo.

#### **4.2.1.5. Conformación del modelo de simulación base.**

Como se mencionó anteriormente, la construcción del modelo de simulación se realizó mediante el software de simulación de tráfico AIMSUN, en un ambiente mesoscópico basado en la simulación de eventos discretos, para lo cual se cuenta con enlaces y carriles individuales, para la cual solamente se considera el vehículo cuando entra y sale de una sección, es decir el movimiento interno no se simula. (Aimsun 20.1, 2017) El objetivo de la simulación fue representar la interacción entre la oferta y demanda del área metropolitana de Bucaramanga, en base a los

insumos actualizados descritos anteriormente, modelando las decisiones de los viajeros a corto plazo en la hora de máxima demanda y relacionando las frecuencias de viaje, modo y rutas, seleccionadas por los conductores para efectuar sus desplazamientos.

El simulador seleccionado supone que los vehículos se mueven a través de secciones y giros, e implementa un conjunto de modelos para lograr la reproducción de las condiciones del tráfico de un área de estudio. Un primer modelo es el de generación de tráfico que cuenta con una cola de entrada virtual definida como una lista de elementos que cuenta con su identificador, tipo de vehículo, su origen y destino. También se tienen los modelos de vehículos en secciones que se dividen en el modelo de seguimiento de coche y cambio de carril, para calcular el tiempo de recorrido de los tramos. (Aimsun 20.1, 2017)

El modelo de seguimiento de vehículos se basa en la influencia de parámetros como el tipo de conductor, la velocidad de vehículo, la velocidad límite de los giros y la influencia de vehículos adyacentes, y cuenta con un modelo modificado de vehículos el cual es un modelo ajustado para simular la congestión en carreteras, esto se logra cambiando la dependencia de la distancia entre vehículo en función de la velocidad; el modelo de cambio de carril, modela un proceso de decisión analizando la necesidad de cambiar el carril a conveniencia para alcanzar la velocidad deseada. (Aimsun 20.1, 2017)

El modelo de nodo mueve los vehículos de una sección a otra, aplicando el modelo de aceptación de brecha que usa los tiempos de salida calculados desde los modelos de seguimiento de coche y cambio de carril, para posteriormente implementar el modelo de selección de carril que calcula los posible orígenes y destinos del movimiento en la sección, para posteriormente calcular los tiempos de viaje considerando las condiciones del tramo aguas abajo del vehículo, para finalmente procesar la salida del nodo. También se considera el modelo de ceda el paso, el cual

se usa para seleccionar cuando el vehículo tiene la prioridad en un movimiento. Los detalles sobre las características y el marco de trabajo de cada uno de los modelos presentados pueden consultarse en el manual de usuario de software (Aimsun 20.1, 2017)

Una vez cargados los insumos necesarios para la ejecución del modelo se procedió a generar un escenario de asignación dinámica para el total del área urbana del área metropolitana de Bucaramanga, al cual se le asignó un valor de identificación, el tiempo y duración de la simulación. Así mismo se relacionó la información de oferta cargando la geometría de la red, los datos de los vehículos considerados, un plan maestro de control que establece el control derivado de la implementación de señalización en el escenario y un conjunto de datos para validación. Finalmente se cargó la demanda OD, la cual corresponde a la demanda estática inicial, la cual se procesó para derivar una demanda dependiente del tiempo en intervalos de 15 minutos, para un periodo de simulación de 06:00 a 07:00 pm.

El primer escenario generado se denominó escenario principal y consistió en representar las características operativas de la red de prueba en condiciones normales de tráfico, a partir de este se generó un experimento y se seleccionó como método de simulación mesosimulación y como método de asignación de ruta SRC. De la mano de una herramienta implementada en el software de simulación, se realizó una primera comprobación del modelo y las condiciones del experimento, identificando errores o advertencias en la gestión del tráfico. De esta forma se resolvieron problemas de conexión a la red, problemas de señalización, geometría y conflictos entre giros.

Una vez resueltos los conflictos y advertencias generadas, se procedió a adecuar el experimento definiendo un periodo de precarga usando 15 minutos de la demanda asignada al escenario de simulación. Así mismo se activó los modelos de comportamiento disponibles para

mesosimulación el modelo de cambio de carril y seguimiento de vehículos, y se definieron los tiempos de reacción como definidos como fijos con el objetivo de que todos los tipos de vehículos se encontraran bajo las mismas condiciones en la simulación.

Se procedió a fijar las condiciones de ejecución de la asignación SRC bajo el algoritmo C-Logit, indicando un intervalo de ejecución de diez (10) minutos para el recalcu de la ruta más corta, y definiendo un valor de uno (1) para el número de intervalos con el objetivo de que los tiempos usados para el cálculo se tomen del intervalo inmediatamente anterior. Estos parámetros fueron seleccionados con el objetivo de evitar una falta de respuesta a los cambios derivados de la congestión. Los parámetros de peso de atractividad y costo definido por el usuario se dejaron por defecto, ya que su modificación implicaba afectar de forma directa la influencia del atractivo de enlace y los costos en la sección evaluada, lo cual podría distorsionar los resultados del modelo.

Una vez definidos los parámetros de la simulación se procedió a ejecutar cinco (5) replicaciones asignando a cada replicación una semilla aleatoria diferente, siendo el resultado global el promedio de los resultados de todas las salidas de la replicación. Los resultados obtenidos incluyen un resumen de los datos de salida de los experimentos, información del total los tiempos de viaje, flujos OD, velocidad, cola media, demoras, y otros parámetros que pueden visualizarse en forma de series temporales. También fue posible visualizar una validación que permitía comparar los datos observados v/s los datos modelados.

Una vez analizados los datos obtenidos de este primer escenario de simulación, se encontró que no se obtuvo una calibración adecuada para el modelo (los supuestos de calibración se presentan en el *Capítulo 4.2.2*). Con el propósito de buscar una mejor representación para el área de estudio, se dividió el área en subredes considerando una para cada municipio, de esta forma se buscó tener una menor área de simulación, ajustando cada evaluación de red a las condiciones

propias del municipio, ya que se presentan fuertes diferencias en cuanto a la distribución de su red y población, lo cual permitió lograr una calibración adecuada para el modelo. Se consideró que este tipo de representación no influye en los resultados buscados para el estudio, ya que las vías de conexión entre los Municipios son escasas por lo que no es posible considerarlas dentro de los objetivos de redistribución de flujos con base en información derivada de las ATIS.

Una vez que fue posible representar las características de la red de prueba en condiciones del flujo habitual, se generaron replicas a partir del mismo, con el objetivo de implementar incidentes y políticas orientados a simular el impacto que produce el suministro de información al usuario en la redistribución de flujos del área de estudio, la metodología implementada y los resultados obtenidos se presentan en el *Capítulo 5* del presente documento.

#### ***4.2.2. Calibración y validación del Modelo de simulación.***

Una vez se efectúa la simulación y se obtienen los resultados de flujos, velocidades, colas, demoras, etc, se procede a realizar la comparación respecto a la información disponible de volúmenes y velocidades la cual fue implementada en la simulación mediante los detectores de tráfico. Para lograr la calibración del modelo, el simulador debe poder emular la información asignada a los detectores, produciendo observaciones similares en el modelo. Posteriormente se realiza una comparación estadística entre las mediciones reales y simuladas con el objetivo de determinar si se ha logrado reproducir el comportamiento del sistema. (Aimsun 20.1, 2017)

Para el presente estudio, se consideró la construcción de un modelo DTA fuera de línea de la red del área metropolitana de Bucaramanga, para lo cual debía calibrarse los diferentes insumos implementados para la oferta y la demanda del modelo, incluyendo la selección de ruta aplicada. La calibración fuera de línea es un paso de optimización global que busca estimar simultáneamente los parámetros de la oferta y la demanda para capturar con mayor precisión las condiciones reales,

existen diversos métodos usados en la literatura en los cuales se puede usar cualquier información de vigilancia de tráfico histórica disponible. (Antoniou, Balakrishna, Koutsopoulos, & Ben-Akiva, 2011).

Debe entenderse que todos los componentes asociados a la simulación interactúan entre sí, por lo cual debe realizarse una adecuada preparación de todos los insumos, tomando las acciones necesarias para lograr la calibración del modelo a medida que se avanza en su construcción. (Aimsun 20.1, 2017) Es posible encontrar en la literatura diferentes propuestas para llevar a cabo el proceso de calibración, entidades como Transport for London (TfL, 2021) y la administración federal de carreteras (FHWA, 2019), proponen primero la definición de un día típico para la ejecución del modelo de simulación, posteriormente sugieren la adecuación de toda la información relacionada realizando comprobaciones en términos de infraestructura vial, geometría, conexiones, señalización y planes de control, así como la verificación de la demanda y la recolección de información de detección requerida para el proceso de comparación. Luego debe ejecutarse la estimación de la demanda de viajes y finalmente realizar una comparación estadística de los datos observados.

El presente modelo consideró las etapas mencionadas anteriormente, realizando una calibración inicial por medio de la ejecución de los ajustes necesarios a la oferta y demanda requerida para la simulación. En el *Capítulo 4.1.1*, se presentó en detalle la preparación realizada a la red configurando los tramos según su clasificación vial, velocidad, restricciones, entre otros. Así mismo se incluyó al modelo la ubicación del sistema de control de tráfico, la señalización, los detectores, y demás atributos relevantes para la adecuación de la red. El *Capítulo 4.1.2*, presentó la totalidad del proceso de ajuste realizado para la información de demanda, el cual consistió en la ejecución de un modelo de asignación orientado a ajustar la demanda para que coincidiera con los

recuentos observados, y posteriormente se efectuó un proceso para perfilar dicha demanda con el propósito de reflejar con mayor precisión la verdadera naturaleza de la demanda de viajes, los resultados obtenidos de este ajuste pueden revisarse en la sección de resultados.

Como se mencionó en el apartado anterior, una primera comprobación o calibración de los elementos asociados a la oferta consistió en la solución de los conflictos, advertencias y errores encontrados en la red de simulación. Así mismo para la calibración de la demanda, se definieron los parámetros necesarios para la ejecución del ajuste de la matriz, obteniendo finalmente una matriz OD actualizada, como puede observarse en el *Capítulo 5.3.1 en el apartado b*. Habiendo ejecutado los primeros pasos de la calibración, se realizó el experimento mesoscópico mediante la asignación dinámica de tráfico por el método SRC.

Los primeros resultados obtenidos del modelo evidenciaron áreas con congestión muy elevada, con acumulación de colas poco realistas, derivadas en su mayoría de conflictos en algunas intersecciones importantes, así como en corredores semaforizados en las vías principales de los Municipios, Por ejemplo, para el caso de la ciudad de Bucaramanga, se evidenció grandes conflictos sobre la carrera 27, la carrera 9 y el área cercana al Centro Comercial Cacique. Para el Municipio de Floridablanca, se evidenció fuertes conflictos en las vías de ingreso al municipio, sobre la calle 5 y en inmediaciones del parque principal. De forma similar ocurrió en los municipios de Girón y Piedecuesta, en donde los principales problemas de congestión se identificaron en las vías de acceso a los municipios, además de las vías cercanas al parque principal.

Con base en esta primera simulación, se realizó una nueva comprobación de la infraestructura, se requirió definir zonas de antibloqueo en las intersecciones con mayor afluencia de flujo en los diferentes municipios, ya que se evidenció que por falta de esta restricción existían

vehículos que obstaculizaban el flujo en otros sentidos y se generaba un bloqueo total del tráfico. De forma adicional debió ubicarse algunas señales de ceda el paso en vías de entrada a los intercambiadores y glorietas con el objetivo de representar mejor las condiciones reales de movilidad.

Otro ajuste realizado consistió en el cambio de algunas señales de pare por señales de ceda al paso, ya que se estaban sobre estimando las demoras, ya que el comportamiento real de los conductores corresponde a una disminución en la velocidad para los cruces, aun cuando la señalización indica un pare total. Finalmente, fue necesario ajustar la geometría de algunos giros, así como el ajuste de conexiones en vías especialmente aquellas que presentaban una longitud corta a la vez que habilitaban varios sentidos de circulación, por lo que fue necesario ajustar las secciones y generar las conexiones una a una para asegurar el correcto funcionamiento de las conexiones.

A medida que se iban solucionando los problemas evidenciados, se corría nuevamente la simulación para evidenciar si a partir de las soluciones propuestas realmente se estaban resolviendo las deficiencias encontradas. Otra comprobación realizada fue la revisión de la información arrojada en la comparación de los detectores, con base en esto se procedió a identificar detectores críticos donde el flujo estaba muy por debajo o por encima de lo esperado, analizando si se encontraban problemas de infraestructura cercanos o si se evidenciaba que el problema podía derivarse del resultado obtenido en la asignación de ruta. No se evidenció en ningún caso que la asignación estuviera generando deficiencias en el modelo.

De forma adicional y con el objetivo de complementar el método de asignación de ruta seleccionado, se generó un plan de asignación de ruta a partir de los resultados de asignación obtenidos del proceso de ajuste de la matriz, con el objetivo de que el método de asignación tomara

como primera entrada el grupo de rutas disponibles. Las rutas derivadas de un resultado de asignación dan una ventaja a la ejecución del modelo, ya que poseen una estructura definida de ruta desde cada enlace de la red a un destino, lo que le permite continuar con su desplazamiento desde un nuevo enlace en caso de que se pierda un movimiento de giro, contrario a las rutas OD que al perder un giro pierden su camino y no hay forma de recuperarlo. Con la implementación de esta solución se evidenciaron resultados positivos disminuyendo la cantidad de vehículos y giros perdidos en la red y logrando la calibración del modelo de simulación.

Los resultados de la calibración se obtuvieron a partir de una comparación estadística mediante un análisis de regresión, elaborando un gráfico de dispersión de los volúmenes pronosticados frente a los observados, trazando la línea de regresión y analizando el coeficiente  $R^2$ . Se espera que el valor de la pendiente sea cercano a 1 para validar el modelo realizado. Los resultados obtenidos pueden consultarse en el *Capítulo 4.3*.

Por último, se realizó el proceso de validación, lo que nos permitió conocer la capacidad del modelo para generar resultados acordes con las mediciones evidenciadas en una red real. Para el caso de la planificación del transporte, la validación consiste en determinar que tan bien se representan los volúmenes de tráfico simulados, respecto a los volúmenes observados, suponiendo que la geometría y conexiones de la red son adecuadas, que se ha definido una matriz OD consistente y se implementaron modelos y funciones de costos que realizan estimaciones razonables. (Aimsun 20.1, 2017)

Para realizar la validación del modelo, debe contarse con información de observaciones de volúmenes vehiculares, con el objetivo de contrastar la información con los resultados de la simulación. Para el presente estudio se aplicó la estadística GEH la cual es una fórmula empírica

ampliamente utilizada para comparar los conjuntos de tráfico. Los resultados se presentan en el siguiente capítulo. (Ortúzar & Willumsen, 2011)

### **4.3. Resultados**

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos del proceso de desarrollo y construcción del modelo de simulación del área metropolitana de Bucaramanga, realizado para evaluar el efecto de la información suministrada a los viajeros y su efecto sobre el comportamiento del tráfico de la zona en estudio. Se muestran los resultados obtenidos para la actualización de la información base, la construcción del modelo y el desarrollo del escenario base de simulación proyectado para la evaluación de diferentes escenarios de penetración de la información.

#### ***4.3.1. Preparación de los insumos requeridos para la construcción del modelo de simulación***

Este capítulo presenta el resultado de la actualización realizada a la información base necesaria para la elaboración del modelo de simulación del área de interés, la cual incluye la red de transporte análoga construida, las zonas de análisis de transporte, la matriz Origen-Destino de viajes, elementos de control de tráfico, así como el levantamiento de información primaria realizado.

##### **4.3.1.1. Actualización de la oferta de transporte.**

Se presenta el resultado de la actualización realizada a la red análoga de transporte del área metropolitana de Bucaramanga, la cual consta de una simplificación de la red total orientada a ajustar los atributos asociados a las vías principales de interés para el presente estudio, según las características actuales de la infraestructura vial existente. Como resultado se presenta la red análoga de transporte la cual consta de un conjunto de nodos y segmentos dirigidos, de tamaño medio con 3433 enlaces de red, 1789 nodos y 5475 giros. Adicionalmente se presenta información

de los atributos actualizados, como el sentido vehicular asignado, las velocidades de operación, e información primaria pertinente.

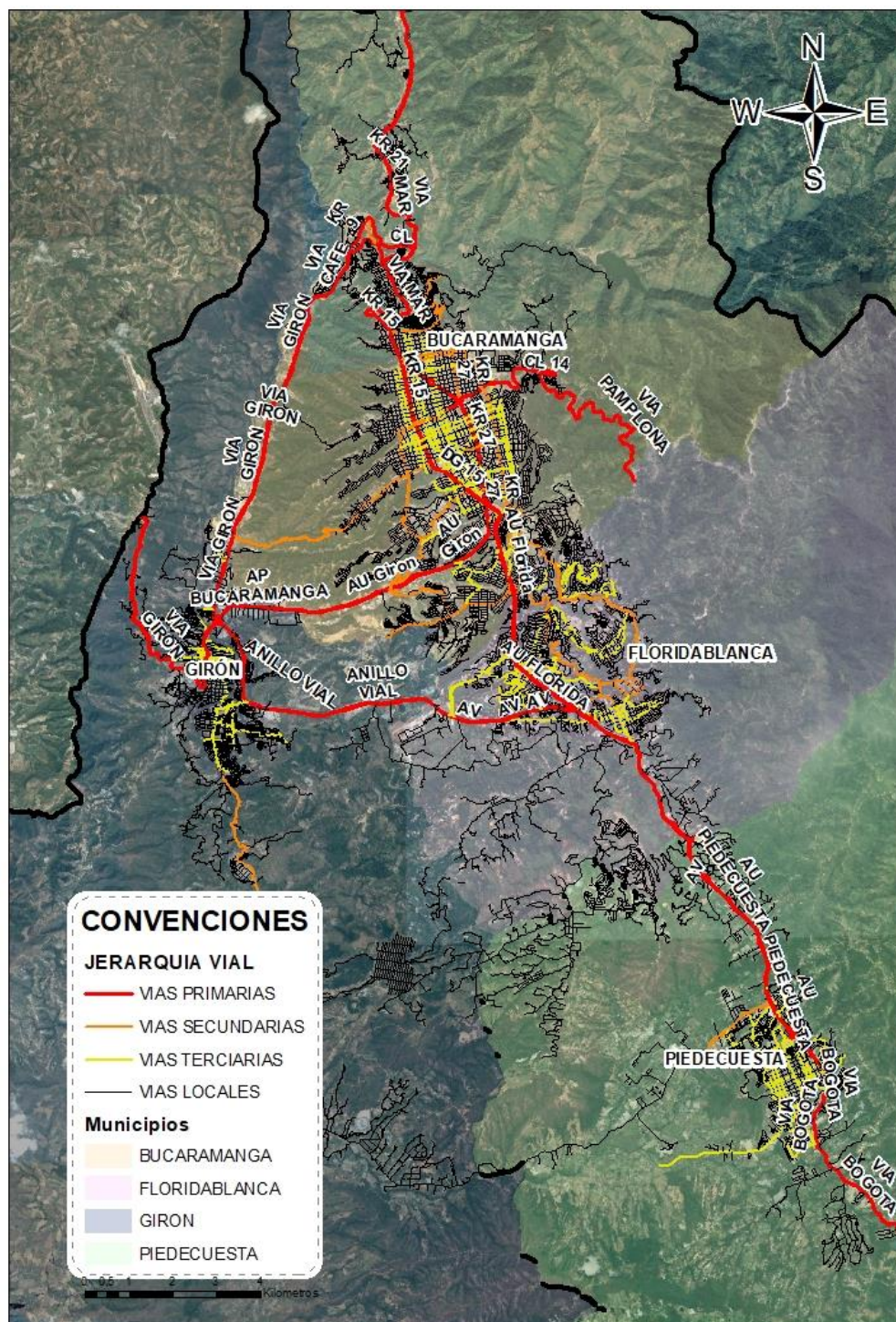
- Red análoga de transporte del área metropolitana de Bucaramanga.

Se presenta el trazado total de la red urbana del área metropolitana de Bucaramanga, a la vez que se muestra el resultado de la simplificación realizada mediante la red análoga construida para el desarrollo del modelo de interés. La *Figura 33* muestra la jerarquización asignada para la red base, mientras que la *Figura 34* muestra la jerarquización asignada para la red análoga, este ejercicio se realiza con el propósito de vislumbrar las diferencias existentes entre la red inicial y la red que ha sido objeto de estudio en la presente investigación.

En la *Figura 35* se puede ver el sentido de flujo vehicular asignado a la red análoga, mientras que la *Figura 36* muestra las velocidades de operación asignadas. El *Apéndice L* contiene la información actualizada en formato SHP, y en el *Apéndice M* se presentan los mapas realizados y presentados en las ilustraciones mencionadas.

Figura 33

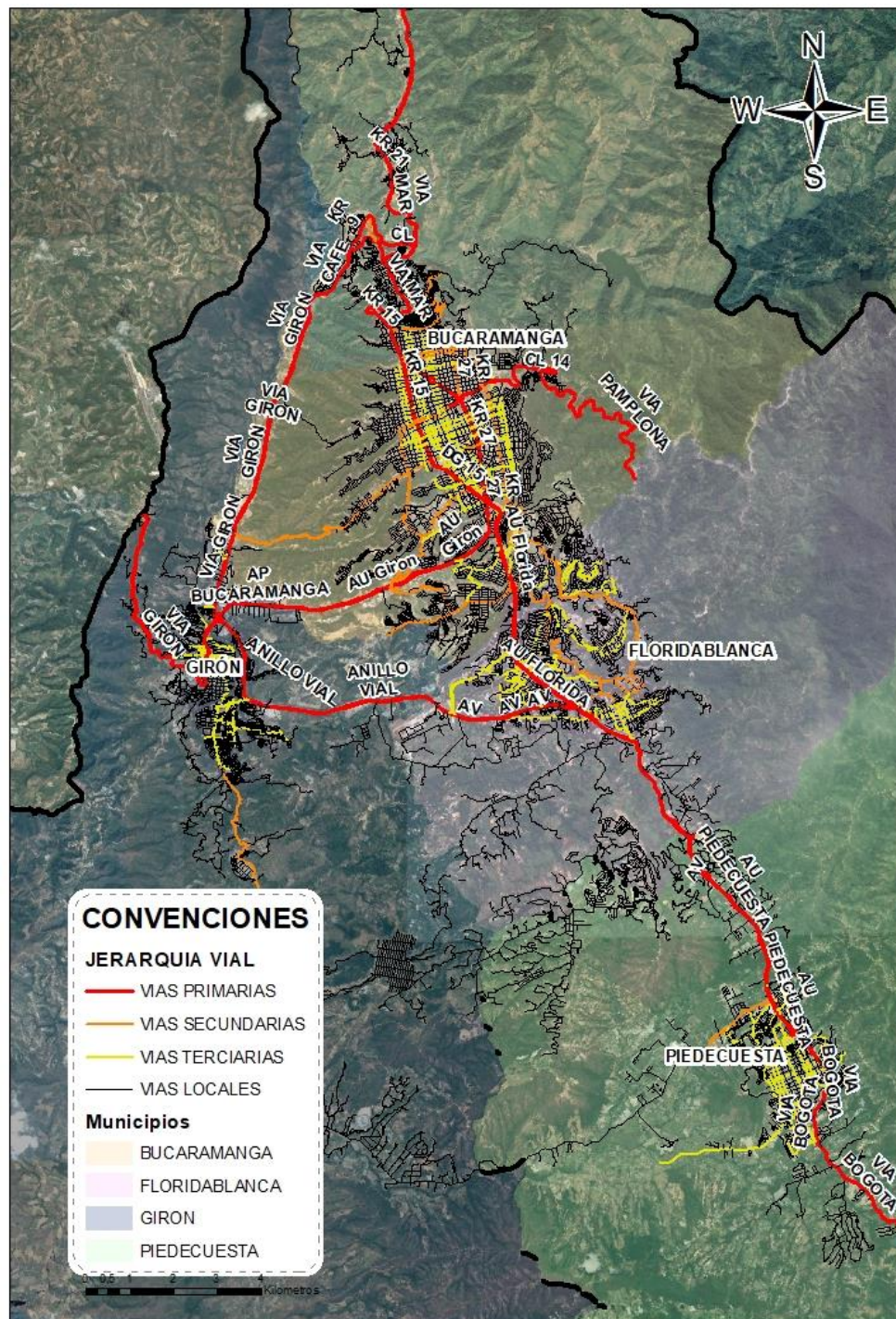
Jerarquización de la red vial base



Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Figura 34

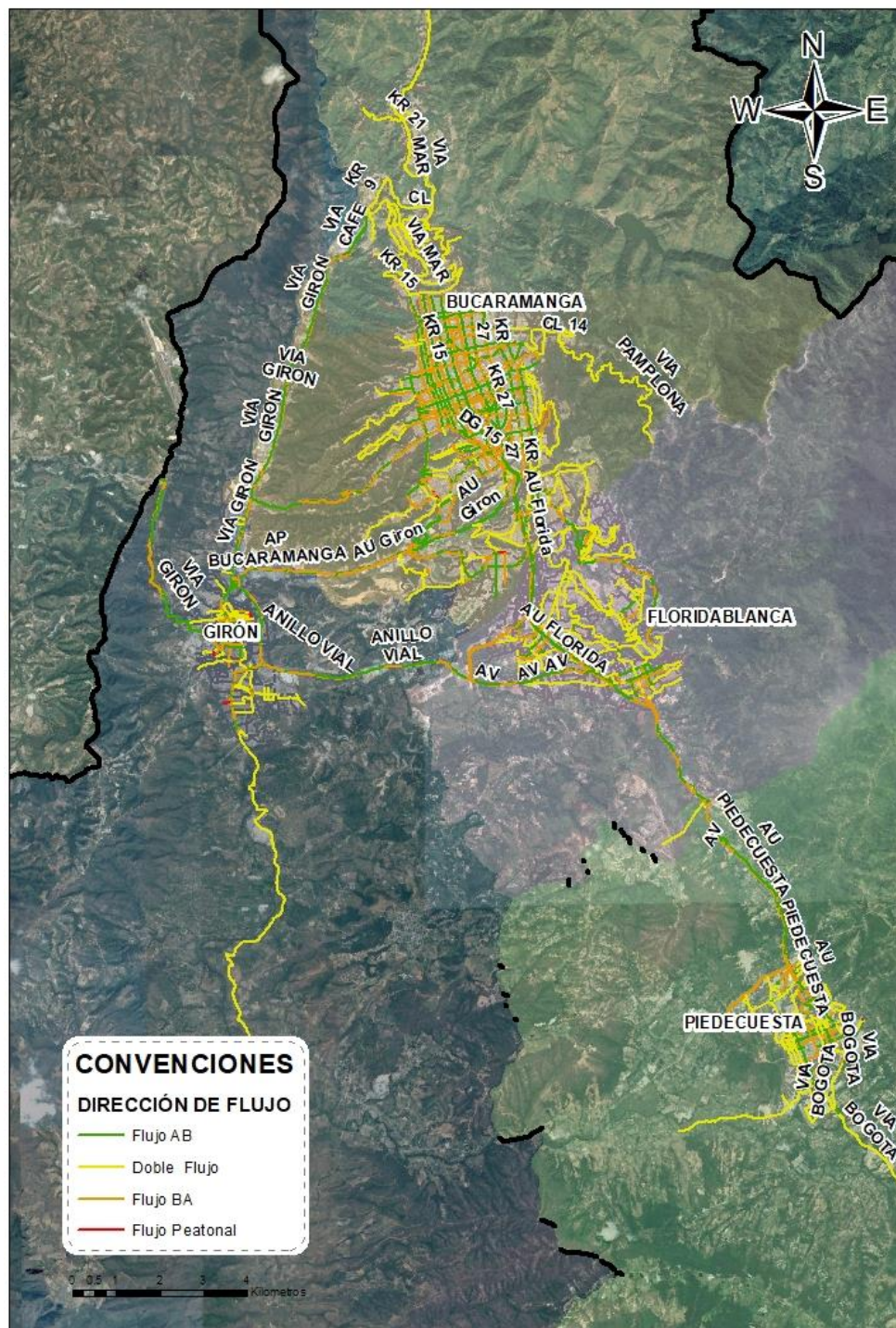
*Jerarquización de la red vial análoga*



*Nota.* Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 35**

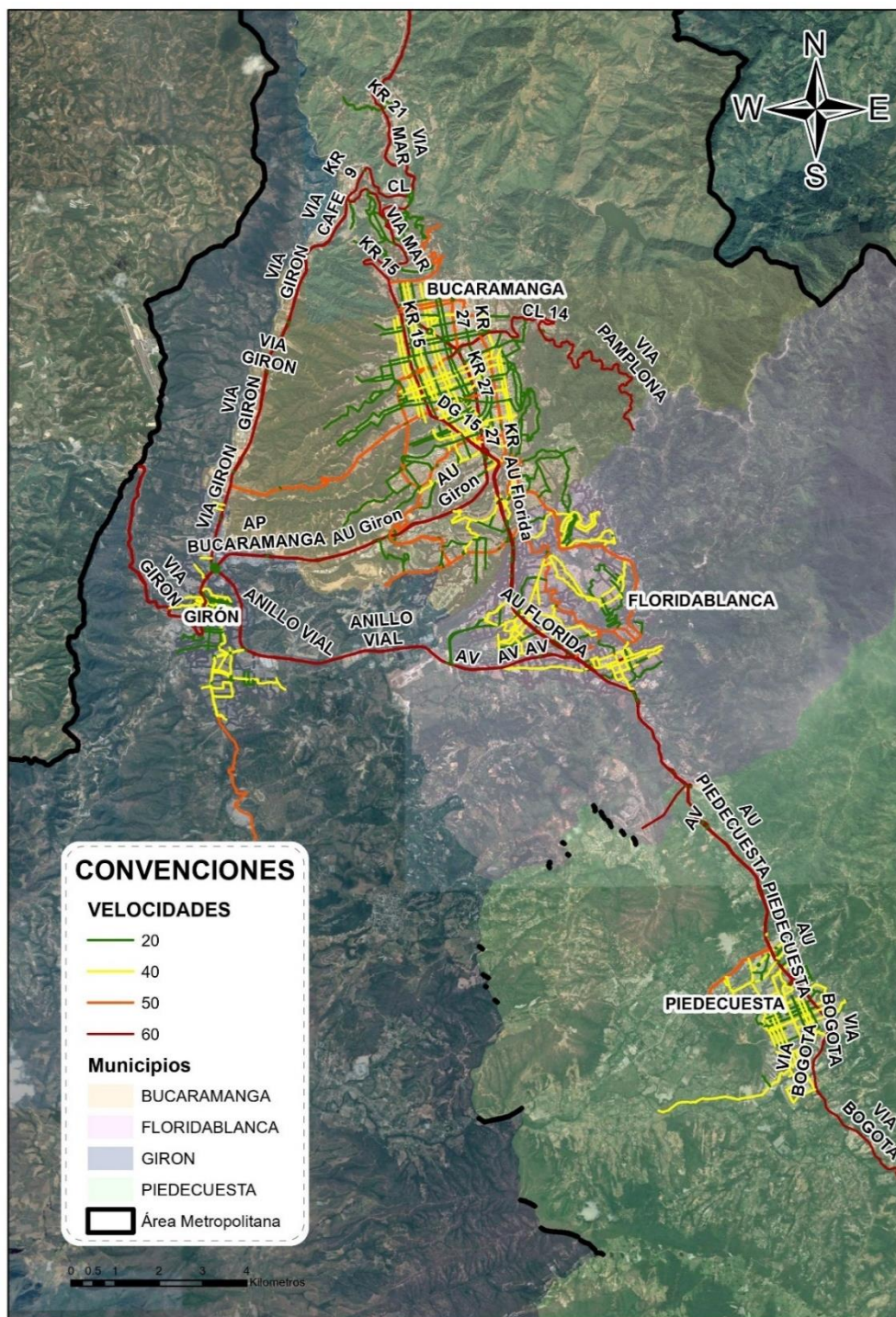
*Flujo vehicular asignado por sentido de circulación asignado a la red vial análoga*



*Nota.* Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 36**

*Velocidad de operación asignada a la red vial análoga*



*Nota.* Fuente: Elaboración Propia.

- Elementos de control de tráfico.

El conjunto de elementos de control definidos para el modelo de simulación de la zona de estudio puede consultarse en el *Apéndice R*, en el cual puede observarse la red análoga en su totalidad, así como los diferentes elementos de señalización, semaforización, y restricciones de giro asignadas, con el fin de representar las condiciones de la infraestructura disponible en los Municipios. La *Figura 37* muestra segmentos de red y ejemplos de los dispositivos de control disponibles, con el propósito de ilustrar al lector.

### Figura 37

*Elementos de control de tráfico ubicados sobre la red análoga del área de estudio*




*Nota.* Fuente: Elaboración Propia.

Respecto a la información relacionada con tiempos y fases semafóricas, en la siguiente tabla puede observarse un ejemplo del levantamiento de información realizado, y en el *Apéndice P*, puede consultarse la totalidad de la información disponible.

**Tabla 21**

*Ejemplo del levantamiento de información de fases y tiempos semafóricos*

| Dirección          | Ubicación   | Fase     | Tiempo (seg) | Fase     | Tiempo (seg) |
|--------------------|---|----------|--------------|----------|--------------|
| Cra 27 -<br>Cll 14 |  | A        |              | C        |              |
|                    |   | Rojo     | 41           | Rojo     | 41           |
|                    |   | Amarillo | 3            | Amarillo | 3            |
|                    |   | Verde    | 44           | Verde    | 44           |
|                    |   | B        |              | D        |              |
|                    |   | Rojo     | 51           | Rojo     | 51           |
| Amarillo           | 3   | Amarillo | 3            |          |              |
| Verde              | 34  | Verde    | 34           |          |              |

*Nota: Elaboración propia*

#### 4.3.1.2. Actualización de la demanda de viajes.

A continuación, se presenta el resultado de la actualización realizada a las zonas de análisis de transporte con base en información oficial disponible y el producto del ajuste realizado a la matriz OD semilla de viajes, la cual se efectuó con base en información de conteos de tráfico del año de referencia, obteniendo como resultado la matriz OD actualizada al año 2019, la cual fue insumo indispensable para la construcción del modelo de simulación del área de estudio.

- Actualización de las zonas de análisis de transporte.

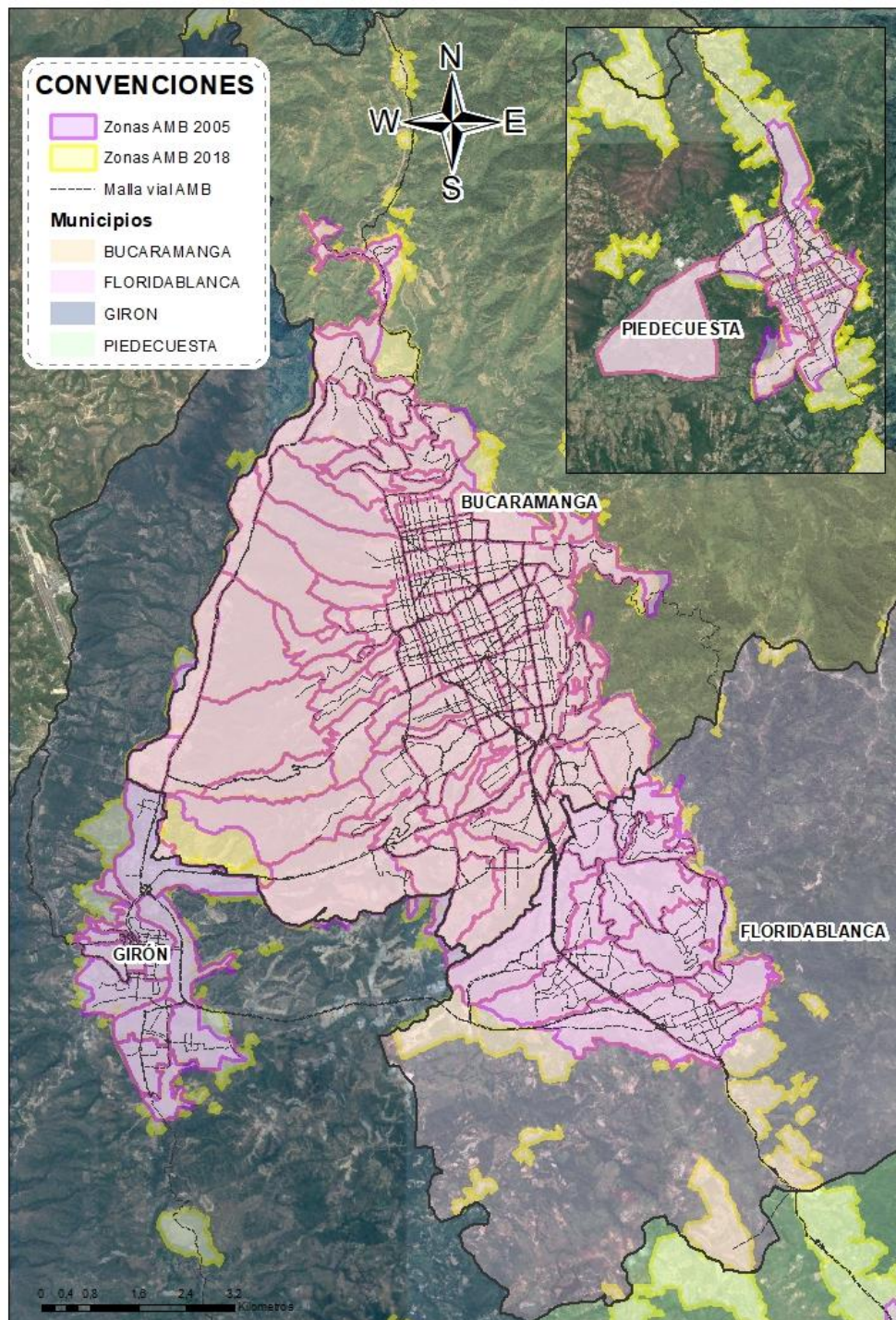
A partir de la metodología propuesta se presenta la zonificación actualizada obtenida a partir de información histórica oficial. En primera medida la *Figura 38* presenta la superposición de la zonificación base con la zonificación DANE definida para el año 2017, el objetivo de esta

comparación es mostrar las diferencias existentes entre el trazado de las diferentes zonas, el cual se hace especialmente relevante en las zonas perimetrales de los municipios acorde con el fenómeno de expansión urbana que experimentan los municipios.

Una vez identificadas las diferencias existentes entre la información base y la información más reciente disponible, se migró la información de viajes a las zonas DANE actualizadas. La *Figura 39*, muestra la información de zonas de análisis de transporte para el año 2005 y la zonificación final, con el propósito de identificar las diferencias existentes entre la información base y la información actualizada.

**Figura 38**

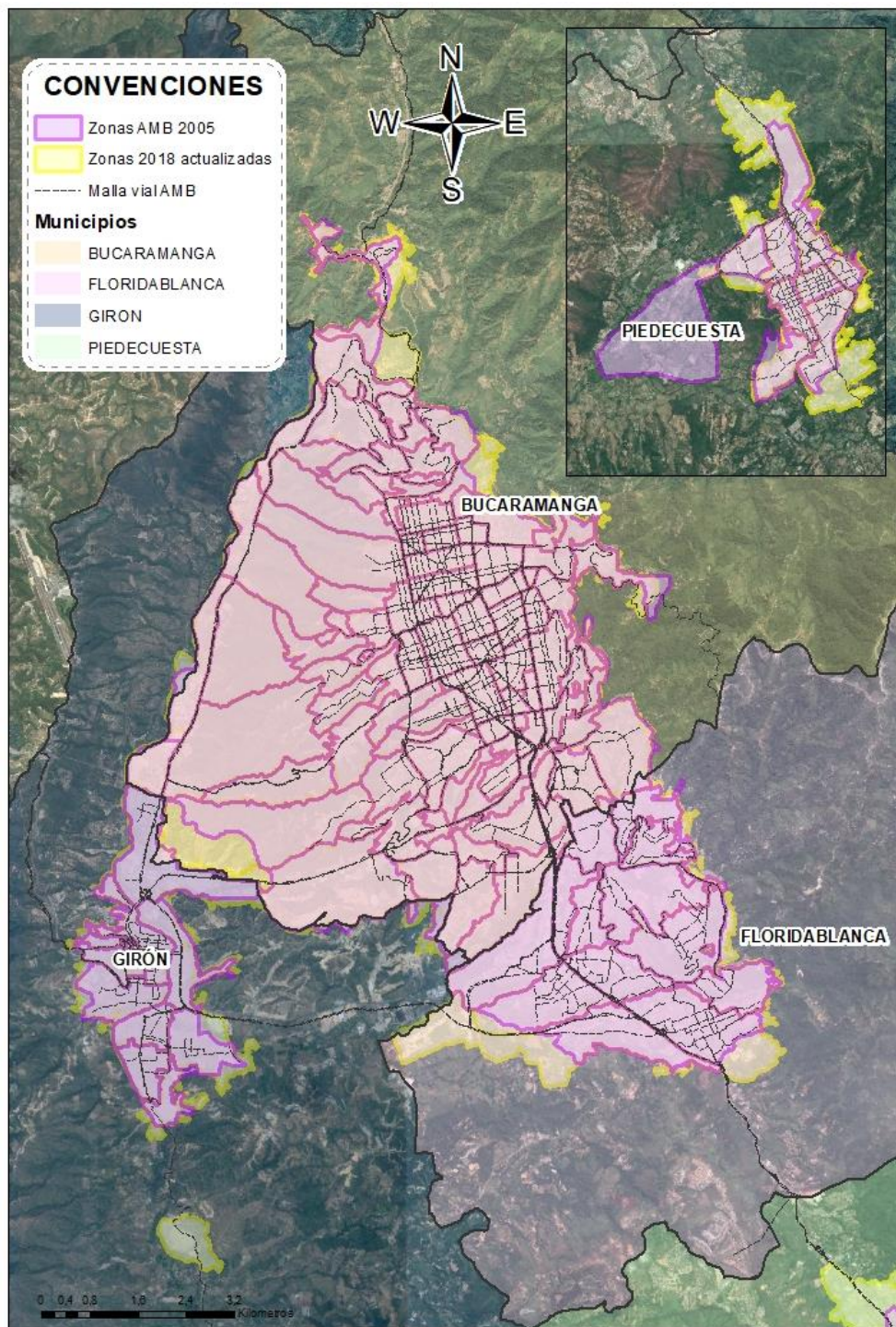
*Zonificación base V/S Zonificación DANE 2027*



*Nota. Elaboración propia*

**Figura 39**

*Zonificación base V/S Zonificación actualizada*



*Nota. Elaboración propia*

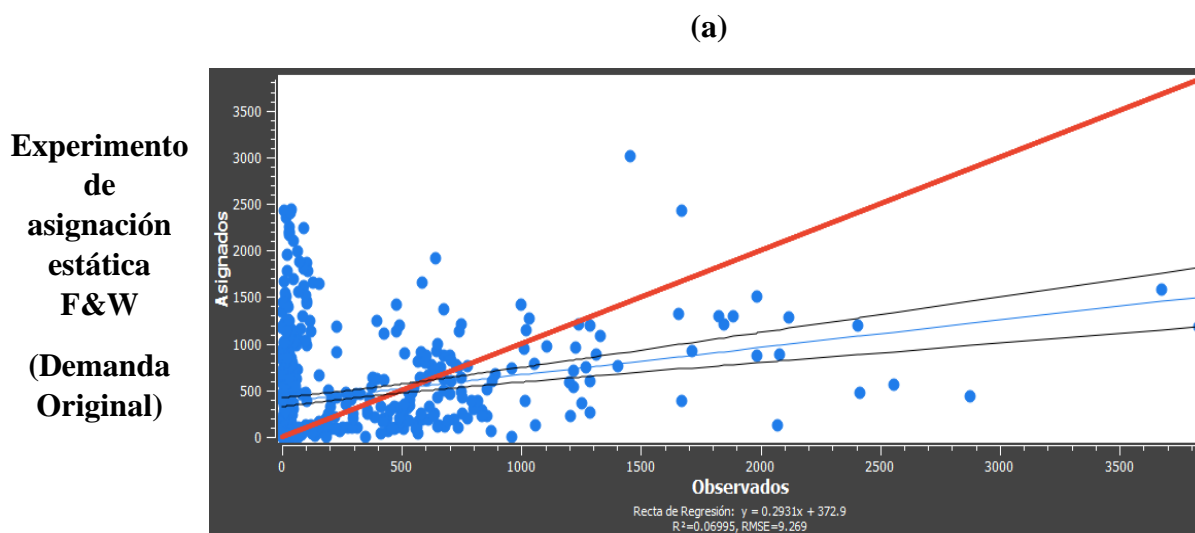
- Matriz de viajes del área metropolitana de Bucaramanga actualizada.

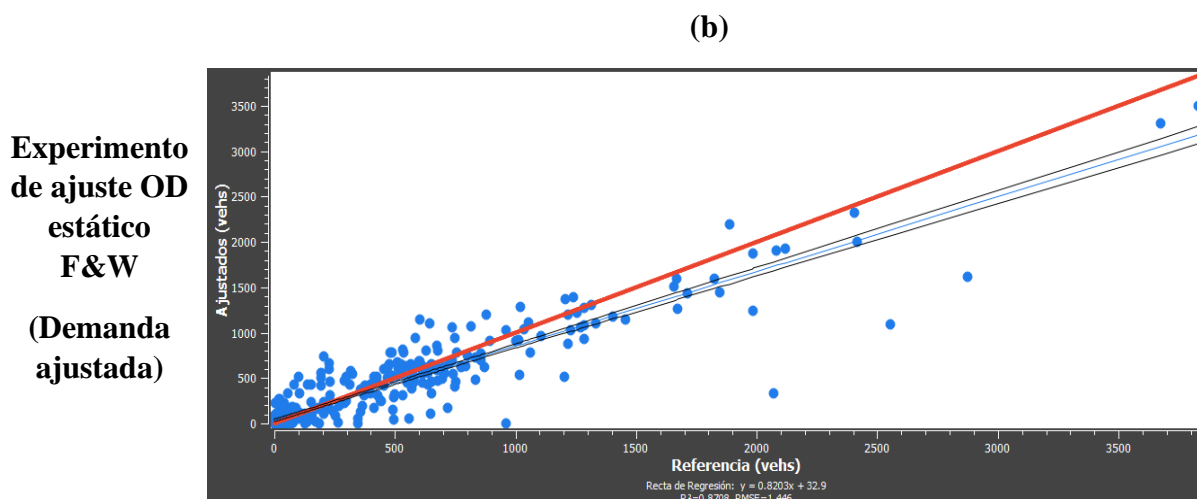
El ajuste OD realizado tuvo como principal resultado la generación de un matiz de viajes actualizada, sin embargo fue posible analizar otros resultados relacionados con el proceso de ajuste, realizando una comparación entre las distribuciones de las duraciones de viajes de la demanda base y la demanda ajustada y una comparación que permite validar los flujos finales asignados contra la información de flujos disponible para la ejecución del método de ajuste, para finalmente generar un informe sobre la convergencia del método.

Como se mencionó anteriormente el ajuste de la matriz OD se realizó mediante dos métodos de asignación, considerando una red de transporte y zonificación actualizada, además de información de flujos vehiculares de referencia para la ejecución del ajuste y la asignación de un valor de elasticidad como referencia. Los resultados asociados a cada experimento se muestran a continuación:

#### Figura 40

*Comparación entre la Demanda base y la demanda ajustada, experimento F&W*





*Nota. Elaboración propia*

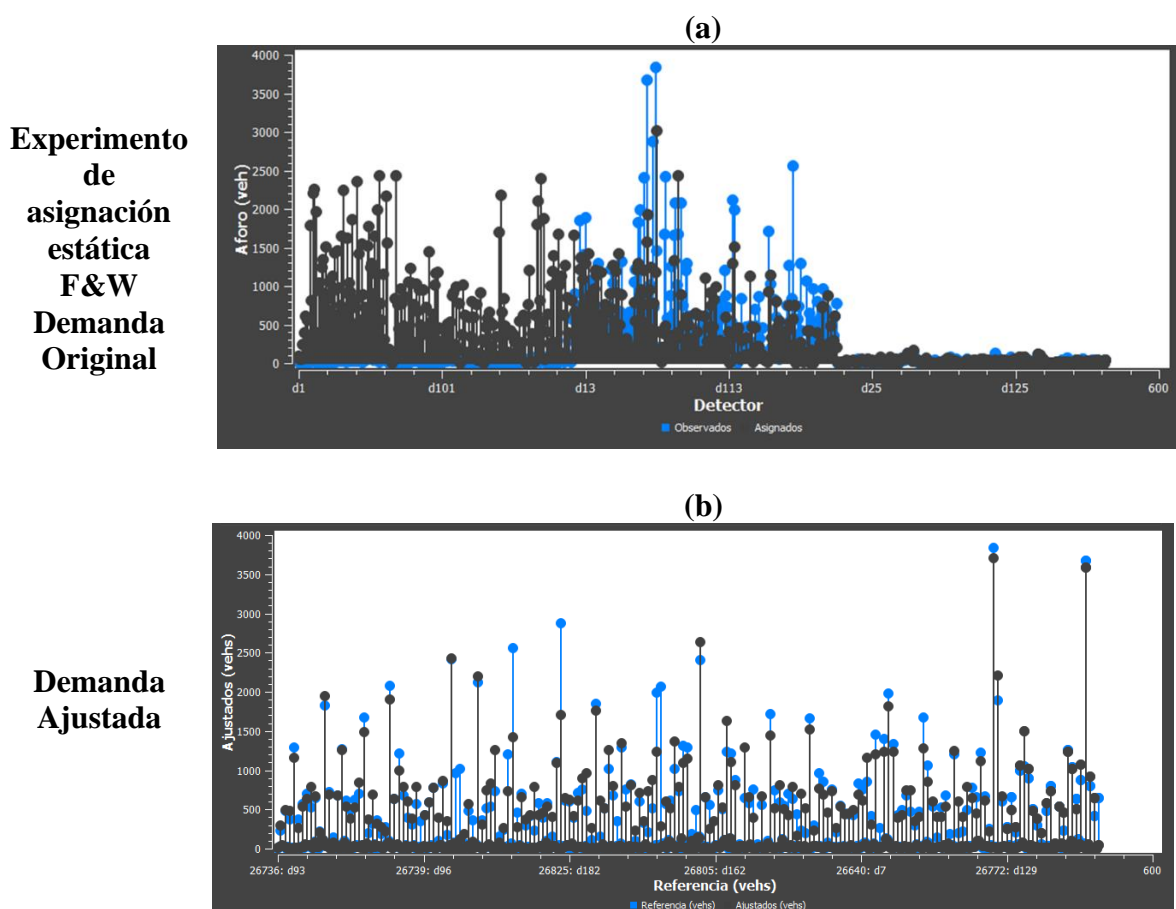
La *Figura 40* presenta los resultados de la validación realizada mediante una recta de regresión por medio de la cual se realizó una comparación entre los resultados de los diferentes escenarios estudiados respecto a los flujos vehiculares de referencia. Como se puede ver en la *Figura 40 (a)*, la información de flujos resultado de la asignación realizada por el método de F&W presenta fuertes diferencias con relación a la información de flujos actualizada, lo cual es coherente considerando que existe una diferencia aproximada de 10 años en la información de flujos asignada. Esta información se presenta exclusivamente como referencia, con el objetivo de mostrar las bondades del proceso de ajuste OD, el cual puede verse en la *Figura 40 (b)*, en donde el  $R^2$  indica que los valores arrojados por el ajuste de la matriz se ajustan a los valores de referencia en un 87%, con una pendiente de la recta que alcanza un valor de 0.82 y un error cuadrático medio (RMSE) de 1.45, parámetros que mejoraron significativamente frente a la asignación inicial.

Como se mencionó anteriormente, el resultado de ajuste buscado no pretende hacer coincidir libremente los conteos de referencia con la matriz ajustada, sino que se busca una aproximación que permita considerar la información relacionada con la distribución y magnitud

de los viajes que aporta la matriz semilla, por tanto, los resultados obtenidos del ajuste se consideran adecuados.

### Figura 41

*Comparación entre los flujos proyectados y los flujos de referencia para la demanda base y la demanda ajustada, experimento F&W*



*Nota. \* Detección se refiere a los flujos tomados de referencia que fueron levantados mediante información primaria.*

*\*Ajustado se refiere a los flujos obtenidos producto de la asignación tanto para el escenario base inicial y la demanda ajustada mediante la actualización realizada.*

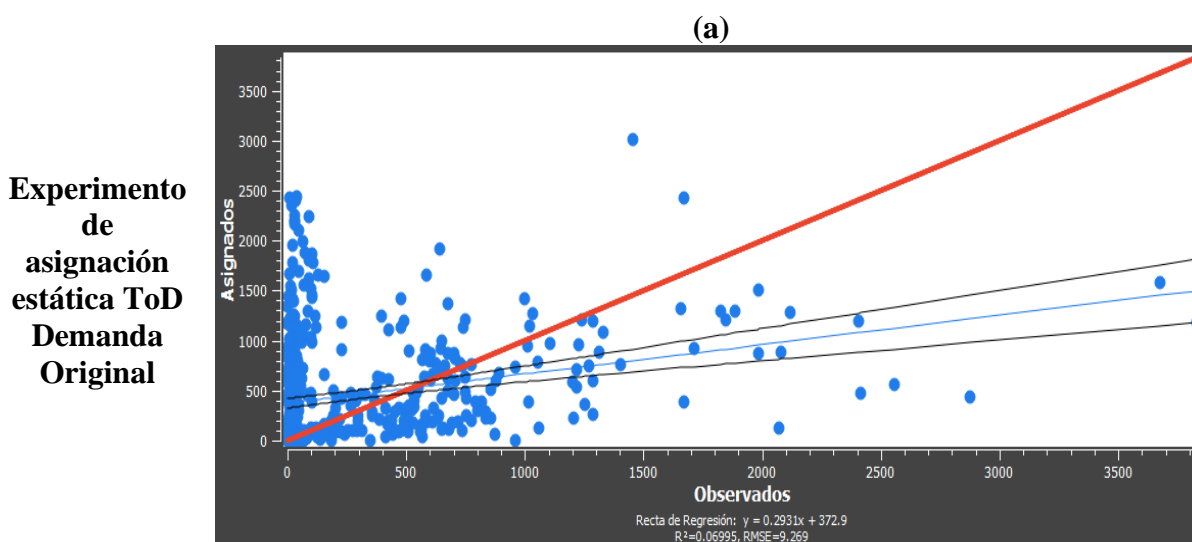
*Fuente: Elaboración propia*

En la *Figura 41*, se muestra otra grafica que permite comparar visualmente el volumen de vehículos asignados v/s el volumen de referencia. Como se puede ver en la *Figura 41 (a)*, los volúmenes de vehículos asignados no guardan ninguna concordancia respecto a los flujos de referencia, mientras que en la *Figura 41 (b)* derivada del proceso de ajuste, puede verse como la distribución de estos se asemejan.

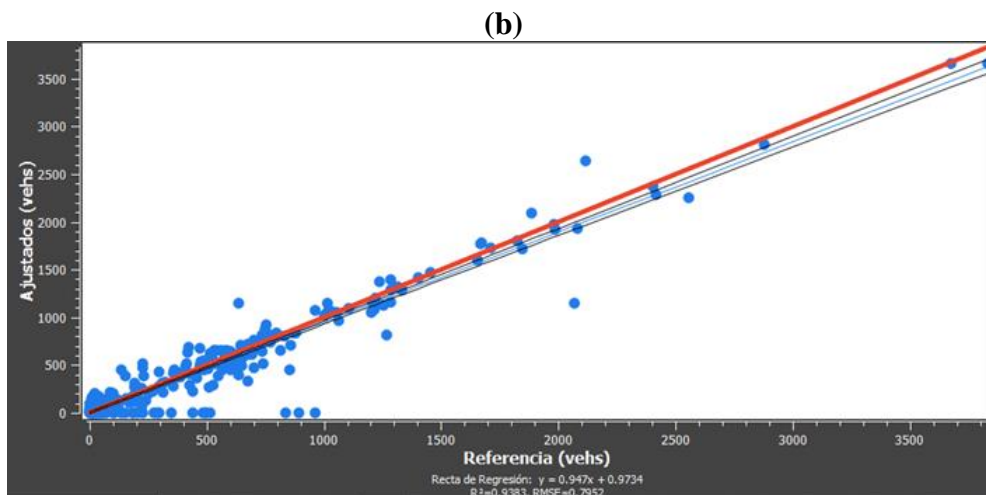
Las *Figuras 42 y 43*, muestran los resultados correspondientes al método de asignación ToD. La *Figura 42 (a)* corresponde al resultado de la asignación estática realizada para el escenario base considerando la matriz OD semilla v/s la información actualizada. En la *Figura 42 (b)*, se muestra el resultado del ajuste realizado a la matriz, como puede verse la pendiente de la recta alcanza un valor de 0.95, mientras que el R2 corresponde a 0.94 con un RMSE de 0.79, parámetros que mejoraron significativamente frente a la asignación inicial.

## Figura 42

*Comparación entre la Demanda base y la demanda ajustada, experimento ToN*



**Demanda Ajustada**



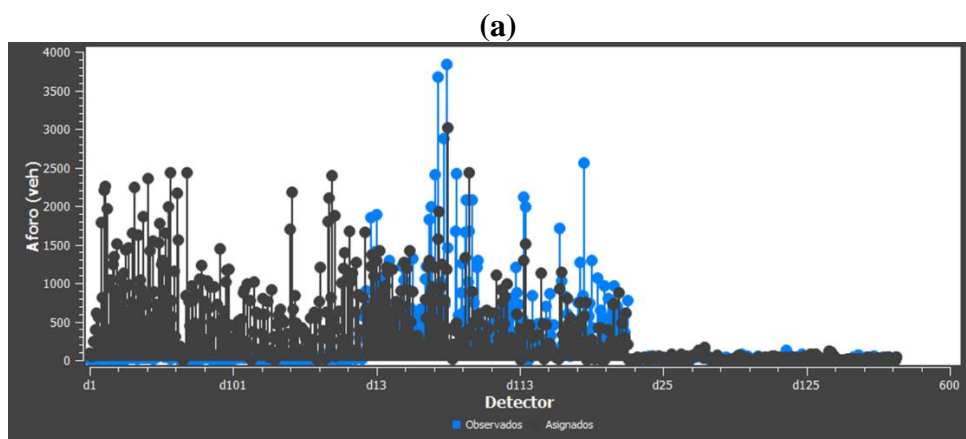
*Nota. Elaboración propia*

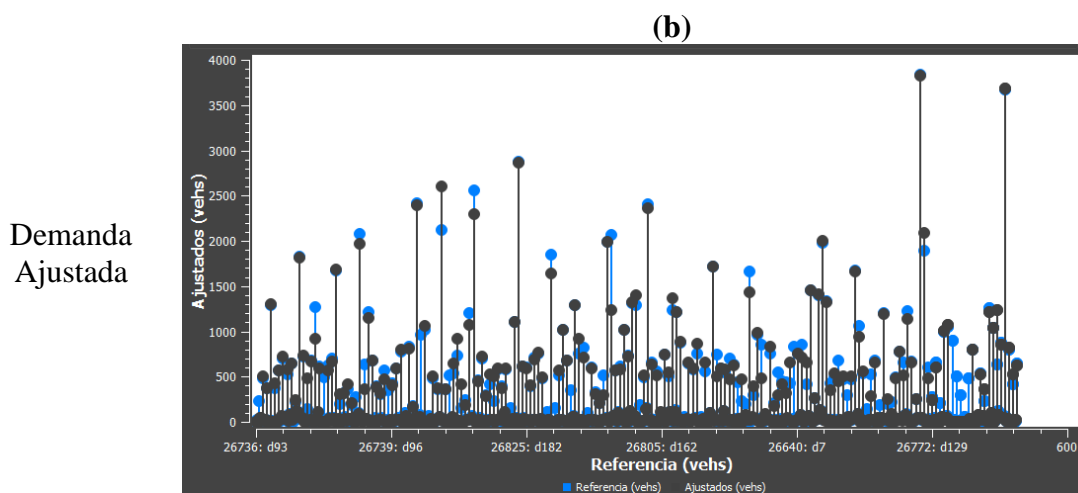
La Figura 43 presenta la comprobación visual del volumen de vehículos asignados v/s el de referencia, en donde puede verse en la parte (a) el resultado de la asignación estática, y en la parte (b) el resultado del proceso de ajuste, el cual como puede verse se aproxima considerablemente a la información de referencia.

### Figura 43

*Comparación entre los flujos proyectados y los flujos de referencia para la demanda base y la demanda ajustada, experimento ToN.*

Experimento de asignación estática ToD Demanda Original





Demanda  
Ajustada

*Nota. Elaboración propia*

Como puede verse, el método que arroja mejores resultados asociados a la comparación realizada por medio de la recta de regresión es el método de ajuste ToN. Sin embargo, ya que este método no representa la situación real de la movilidad en el área de estudio al no considerar los efectos de la congestión y la variación en las preferencias de los usuarios, para el presente ejercicio de modelación se seleccionó como matriz OD actualizada, la generada en el ajuste realizado por el método F&W. Se considera que esta matriz representó de mejor forma el comportamiento de la demanda del área de estudio, a la vez que el proceso de ajuste consideró además de los flujos vehiculares de referencia, la magnitud y distribución de los viajes definidos en la matriz semilla original.

Finalmente, como resultado del ajuste realizado se obtuvieron 3 matrices de viaje actualizadas cuadrada de 129X129, que corresponden a las ZATs actualizadas y que presentan la información relacionada a cada uno de los modos de transporte. La matriz asociada al transporte privado se proyecta con un aproximado de 45.000 viajes/ hora punto, la matriz de transporte privado cuenta con 52.000 viajes/hora punta y finalmente la matriz de carga relaciona alrededor

de 4500 viajes/hora punta. En el *Apéndice Q*, puede consultarse en las matrices obtenidas, así como los resultados asociados al proceso de ajuste.

#### ***4.3.2. Construcción del modelo mesoscópico para simular el efecto de la penetración de la información en el estado de tráfico de la ciudad***

Con el objetivo de conocer las condiciones de movilidad típicas del área metropolitana de Bucaramanga, se construyó un modelo de simulación a partir de los insumos relacionados en el *Capítulo 4.1* y la metodología descrita en el *Capítulo 4.2*. El modelo de simulación se construyó en un ambiente de simulación mesoscópico, efectuando una asignación dinámica mediante el modelo de elección de ruta SRC y el algoritmo de aplicación C-Logit. A continuación, se relaciona los resultados obtenidos de la ejecución del modelo de simulación construido y los resultados derivados de la calibración y validación aplicada para la verificación del modelo.

##### **4.3.2.1. Validación y calibración del modelo de simulación.**

La cuantificación de los errores es parte fundamental de la evaluación del rendimiento de un modelo. Tal como se explicó en la metodología, el primer paso efectuado para la calibración del modelo consistió en la preparación de los insumos de oferta y demanda necesarios para la construcción del modelo, los resultados se presentaron en el *Capítulo 4.3.1*. Posteriormente se realizó el ajuste de los recuentos de acuerdo con la información asociada a los detectores y a las observaciones de velocidades por vehículos flotantes disponibles.

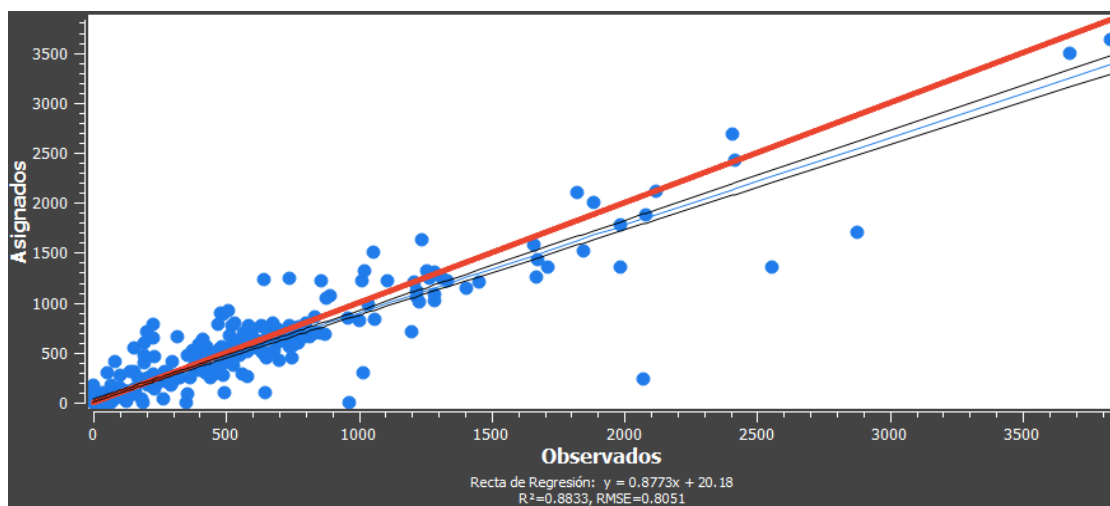
Con el objetivo de medir el error entre las cantidades observadas y simuladas, se buscó reproducir los volúmenes vehiculares y las velocidades medidas en campo, para lo cual se incluyó un análisis de regresión lineal que busca medir las diferencias existentes entre los valores de referencia y los resultados de la simulación realizada y el indicador GEH el cual es una fórmula

empírica ampliamente usada en la modelación de transporte para comparar dos conjuntos de volúmenes de tráfico.

La *Figura 44*, muestra el resultado obtenido del análisis de regresión realizado al modelo de simulación, para el cual se obtuvo un  $R^2$  que indica que los valores observados del modelo se ajustan en un 88% a los valores de referencia, con un RMSE de 0.8051 lo que indica una diferencia menor entre los resultados de la simulación y las observaciones. Se considera que los valores obtenidos del análisis de regresión son adecuados para el modelo de la situación actual de la red en estudio.

#### Figura 44

*Análisis de regresión realizado al modelo de simulación*



*Nota. Elaboración propia*

Además de los valores de volúmenes vehiculares, se realizó un análisis similar para los datos de velocidad considerando los valores simulados v/s los valores obtenidos en el levantamiento de información de campo. Las *Tablas 22 y 23*, presentan los resultados obtenidos en cada caso y relacionan el error RMSE calculado para los diferentes conjuntos de datos. Como puede observarse, el RMSE calculado indica que las diferencias encontradas entre los valores

simulados y observados no son muy altas, y para los efectos de la presente investigación se consideran adecuados. Los resultados obtenidos para los demás corredores en estudio pueden consultarse en el *Apéndice V*.

**Tabla 22**

*Velocidades simuladas y observadas tramo Carrera 33 entre calle 36 y Cacique*

| <b>Punto de referencia</b>            | <b>Observado</b>    | <b>Simulado</b> | <b>Observado</b>    | <b>Simulado</b> |
|---------------------------------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
|                                       | <b>Velocidad AB</b> |                 | <b>Velocidad BA</b> |                 |
| <b>Carrera 33 - Calle 36</b>          | 4.28                | 3.82            | 18.56               | 18.79           |
| <b>Carrera 33 - Calle 41</b>          | 28.29               | 30.52           | 9.78                | 4.26            |
| <b>Carrera 33 - Calle 48</b>          | 8.04                | 9.26            | 11.06               | 13.98           |
| <b>Carrera 33 - Calle 52</b>          | 9.12                | 15.69           | 22.11               | 24.44           |
| <b>Carrera 33 - Calle 56</b>          | 14.59               | 24.90           | 17.29               | 12.04           |
| <b>ingreso viaducto la Flora</b>      | 16.44               | 20.95           | 34.91               | 48.48           |
| <b>Salida viaducto la Flora</b>       | 32.91               | 41.12           | 41.79               | 42.25           |
| <b>Salida Intercambiado - Cacique</b> | 12.99               | 18.26           | 19.70               | 33.89           |
| <b>Punto mini Glorieta Cacique</b>    | 41.76               | 39.90           | 29.79               | 31.6            |
|                                       | <b>RMSE AB</b>      | 5.26            | <b>RMSE BA</b>      | 6.79            |

*Nota. Elaboración propia*

**Tabla 23**

*Velocidades simuladas y observadas tramo Carrera 27 entre calle 36 y Cañaverál*

| <b>Punto de referencia</b>                                | <b>Observado</b>    | <b>Simulado</b> | <b>Observado</b>    | <b>Simulado</b> |
|---|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
|   | <b>Velocidad AB</b> |                 | <b>Velocidad BA</b> |                 |
| <b>Cra 27 - Calle 36</b>                                  | 14.60               | 10.06           | 5.88                | 5.32            |
| <b>Cra 27 - Calle 45</b>                                  | 14.26               | 11.93           | 7.13                | 8.79            |
| <b>Cra 27 - Av González Valencia</b>                      | 24.74               | 19.85           | 5.06                | 5.79            |
| <b>Cra 27 - Calle 56</b>                                  | 18.11               | 20.25           | 25.89               | 38.11           |
| <b>Puerta del sol - Ingreso intercambiador</b>            | 42.92               | 47.64           | 47.51               | 59.72           |
| <b>Puente Paradero Metrolínea - Autopista Bucaramanga</b> | 47.51               | 48.96           | 52.06               | 60.47           |
| <b>Puente peatonal estación diamante</b>                  | 54.23               | 60.12           | 44.77               | 59.72           |

|  |                |       |                |       |
|--|----------------|-------|----------------|-------|
| <b>Puente intercambiador<br/>Provenza</b>  | 51.30          | 54.51 | 26.73          | 20.78 |
| <b>Estación Metrolínea<br/>Hormigueros</b> | 48.25          | 57.66 | 34.34          | 28.92 |
| <b>Estación Metrolínea<br/>Cañaveral</b>   | 37.68          | 38.49 |                |       |
|  | <b>RMSE AB</b> | 4.62  | <b>RMSE BA</b> | 8.57  |

*Nota. Elaboración propia*

Posteriormente se realizó un ejercicio de validación mediante la aplicación de la fórmula estadística GEH. Se espera que entre el 60% y el 85% de los volúmenes en el modelo obtengan un valor de GEH inferior a 5 lo cual indica una adecuada correspondencia entre los vehículos observados y simulados, se espera que entre el 85% y el 95% de los resultados obtengan un valor de GEH entre 5 y 10, lo que indica que los resultados se ajustan de forma moderada. Para valores de GEH mayores, se recomienda hacer un análisis más detallado ya que puede existir problemas con la información tomada en campo o en la representación del modelo. En la *Figura 45*, se pueden observar los resultados obtenidos de la aplicación del estadístico GEH y en la *Tabla 24* se pueden observar el promedio de la validación para cada uno de los municipios del área de estudio. (Ortúzar & Willumsen, 2011; Cuellar, 2016)

**Tabla 24**

*Valores de GEH obtenidos para las subredes estudiadas*

|                         | <b>Bucaramanga</b> | <b>Floridablanca</b> | <b>Piedecuesta</b> | <b>Girón</b> |
|-------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------|
| <b>GEH total &lt;5</b>  | 71%                | 69%                  | 89%                | 78%          |
| <b>GEH total &lt;10</b> | 89%                | 83%                  | 100%               | 94%          |
| <b>GEH total &gt;10</b> | 11%                | 17%                  | 0%                 | 6%           |

*Nota. Elaboración propia*

Figura 45

Representación gráfica resultados del estadístico GEH en los puntos de control



Nota. Elaboración propia con base en el Google Earth.

De acuerdo con la bibliografía consultada y a los resultados obtenidos para los análisis de calibración y validación propuestos, se determinó que es razonable concluir que el modelo propuesto se ajusta moderadamente a la situación real de movilidad del área de estudio. Es importante considerar que el modelo propuesto es una estimación general del comportamiento real en el entorno del área metropolitana de Bucaramanga, sin embargo, el resultado obtenido puede mejorarse considerablemente al contar con la matriz de viajes OD que está siendo actualizada mediante el levantamiento de información primaria de viajes, ya que de esta forma se tendría una matriz que represente los patrones de movilidad actualizados con base en información primaria de primera mano, en lugar de la proyección realizada con los conteos. De la misma forma al contar con un mayor número de datos de vigilancia, será posible obtener un modelo de planificación más preciso.

#### **4.3.2.2. Resultados obtenidos del modelo dinámico en un entorno de simulación microscópico.**

Una vez calibrado y validado el modelo de simulación, se procedió a generar los resultados de la simulación que describen el rendimiento de la red en estudio. La *Tabla 25* presenta los principales resultados de la simulación, para cada uno de los municipios pertenecientes al área metropolitana, derivados del análisis realizado a las subredes en estudio.

**Tabla 25**

*Resultados derivados del modelo de simulación ejecutado*

| <b>Serie Temporal</b>     | <b>Unidades</b> | <b>Bucaramanga</b> | <b>Floridablanca</b> | <b>Girón</b> | <b>Piedecuesta</b> |
|---------------------------|-----------------|--------------------|----------------------|--------------|--------------------|
| <b>Cola Media - Todos</b> | veh             | 8073               | 3038                 | 21           | 24                 |
| <b>Cola Media - Bus</b>   | veh             | 3081               | 81                   | 1            | 0                  |

|                                  |        |        |        |       |        |
|----------------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|
| <b>Cola Media - Coche</b>        | veh    | 4854   | 2919   | 19    | 22     |
| <b>Cola Media - Camión</b>       | veh    | 138    | 38     | 1     | 1      |
| <b>Tiempo de Demora - Todos</b>  | seg/km | 130    | 133    | 5     | 17     |
| <b>Tiempo de Demora - Bus</b>    | seg/km | 247    | 29     | 2     | 13     |
| <b>Tiempo de Demora - Coche</b>  | seg/km | 98     | 151    | 5     | 17     |
| <b>Tiempo de Demora - Camión</b> | seg/km | 84     | 58     | 3     | 16     |
| <b>Tiempo de Viaje - Todos</b>   | seg/km | 218    | 219    | 72    | 82     |
| <b>Tiempo de Viaje - Bus</b>     | seg/km | 339    | 131    | 74    | 73     |
| <b>Tiempo de Viaje - Coche</b>   | seg/km | 185    | 235    | 71    | 82     |
| <b>Tiempo de Viaje - Camión</b>  | seg/km | 155    | 137    | 74    | 85     |
| <b>Velocidad - Todos</b>         | km/h   | 25/13* | 26/14* | 50/7* | 50/10* |
| <b>Velocidad - Bus</b>           | km/h   | 24/16* | 30/10* | 49/6* | 55/8*  |
| <b>Velocidad - Coche</b>         | km/h   | 26/12* | 26/15* | 51/7* | 50/10* |
| <b>Velocidad - Camión</b>        | km/h   | 33/16* | 26/13* | 49/7* | 48/9*  |

Nota. \* Se relaciona el valor de desviación estándar asociado al valor de velocidad obtenido.

\*Elaboración propia

El modelo obtenido indica que existen corredores congestionados al largo de las vías e intercambiadores principales de los diferentes Municipios. Como puede verse, las velocidades promedio evidenciadas a nivel de red están cerca de los 25 Km/hora para Bucaramanga y

Floridablanca, mientras que para Girón y Piedecuesta estos valores llegan a 50 Km/hora. Sin embargo, al analizar el valor de la desviación estándar de las velocidades simuladas, se encontró que en promedio los valores de velocidad en los segmentos de la red se desvían de la media entre 7 y 14 Km/hora, sin embargo, existen segmentos de red que presentan velocidades inferiores al valor promedio presentado, las cuales coinciden con los segmentos de red con mayor congestión en la red.

Los resultados obtenidos del modelo principal presentado fueron la base para la evaluación de los escenarios de suministro de información, ya que, a partir de las condiciones típicas de la red del escenario principal, se efectuaron las comparaciones requeridas para evaluar los impactos derivados de la implementación de incidentes en la red, a la vez que se evaluó las políticas de suministro de información al viajero ATIS propuestas según lo descrito en el *Capítulo 3*.

Así mismo la información presentada en la Tabla 24, corresponde a la información arrojada en la simulación para las variables que el investigador seleccionó ya que presentan la información más relevante sobre el rendimiento de la red estudiada, sin embargo también es posible consultar otras estadísticas asociadas al de red como colas virtuales máximas y medias, los contajes de entradas y salidas, flujos, giros perdidos, cambios de carril, número de paradas, vehículos dentro, vehículos fuera, entre otras estadísticas que se presentan de forma detallada en el *Apéndice U*.

#### **4.4. Conclusiones de la construcción del modelo de mesosimulación.**

Se construyó una red análoga de transporte para el área metropolitana de Bucaramanga, la cual simplificó la red vial actual con el propósito de optimizar el estudio de la infraestructura vial y disminuir los tiempos de procesamiento. La red propuesta incluyó la red primaria de los municipios que albergan los mayores volúmenes vehiculares, la red secundaria y terciaria como vías alternas de conexión y las vías locales de primer grado como vías de alimentación. Las vías

locales de segundo grado se excluyeron del estudio ya que la evaluación realizada permitió determinar que estas vías no ofrecían beneficios de conexión para la redistribución requerida en el proyecto.

Los atributos asociados a la red como Jerarquización, sentidos vehiculares, velocidades, tiempos, capacidades, entre otros parámetros requeridos para la ejecución del modelo, fueron actualizados en su totalidad a las condiciones actuales de la malla vial en estudio. La red análoga resultado consta de un conjunto de nodos y segmentos dirigidos, de tamaño medio con 3433 enlaces de red y 1789 nodos y 5475 giros

Teniendo como referencia la información secundaria disponible, se realizó una actualización de las zonas de análisis de transporte del área de estudio, la cual incluyó una revisión minuciosa de la georreferenciación de los centroides generadores y atractores de viajes, y la verificación de la información asociada a cada uno de ellos, subsanando las inconsistencias encontradas en el proceso.

Se actualizó la información de demanda origen destino la cual consistió en la ejecución de un ajuste estático basado en el levantamiento de información primaria de conteos vehiculares, la información de la oferta actualizada y la ejecución de un método de asignación, a través del cual como resultado se obtuvo una matriz ajustada OD actualizada con sus respectivas distribuciones de duraciones de viajes. Se obtuvieron 3 matrices de viaje (particular, público y carga), de dimensiones 129X129, con un aproximado de viajes para el transporte privado de 45000 viajes/hora punta, 52000 viajes hora/punta para el transporte público y 9000 viajes hora para el transporte de carga.

La construcción del modelo de simulación se realizó con base en la información de oferta y demanda actualizada y ajustada, se identificó la herramienta de simulación AIMSUN para

integrar los insumos y proceder con a la construcción del modelo. La escala de simulación seleccionada fue mesoscópica como modo intermedio de simulación intermedio, y con el propósito de abordar con menor detalle la evolución de tráfico al enfrentarnos a una red de tamaño moderado. El método de asignación seleccionado fue la asignación dinámica de tráfico, ya que permite evaluar de forma realista la aplicación de tecnologías ATIS al considerar la modelación de corredores congestionados, debido a por ejemplo la incidencia de accidentes, así como el suministro de información de tráfico, lo cual es el objetivo final de la simulación

El método de asignación de ruta seleccionado fue el de elección de ruta estocástica (SRC) ya que se enfoca en la teoría de elección discreta y en enfoque probabilísticos, el cual prevé la optimización de las decisiones de ruta basándose en información disponible, y seleccionando el método C-Logit para abordar el problema de optimización. Este método realiza una distinción entre el costo de viaje percibido por los usuarios y el costo de viaje real, estableciendo un principio de equilibrio en el cual ningún viajero puede mejorar el costo de viaje percibido cambiando su ruta unilateralmente. Adicionalmente en algunos estudios se ha evidenciado que estos modelos representan muy bien condiciones atípicas como accidentes que puedan presentarse en la red.

La calibración y validación del modelo consistió en una preparación minuciosa de los parámetros de oferta y demanda como primer paso. Se buscó optimizar de forma global y simultanea la oferta y la demanda resolviendo conflictos y advertencias encontrados en el proceso de simulación. Los primeros resultados del modelo evidenciaron áreas con congestión muy elevada, con acumulación de colas poco realistas, por lo cual se resolvieron conflictos en intersecciones importantes y sobre corredores semaforizados en las vías principales. Se ajustaron las señales para representar el comportamiento real de los conductores en la red y se procedió a identificar detectores críticos para resolver los problemas en infraestructura cercanos. Con el

propósito de complementar el método de asignación de ruta se generó un plan de asignación de ruta a partir de los resultados de asignación obtenidos del proceso de ajuste de la matriz, con el objetivo de que, al contar con una estructura definida para las rutas, se disminuyeran el número de vehículos y giros perdidos en la red.

Los resultados obtenidos de la calibración se derivan de una comprobación estadística en la cual se realizó un análisis de regresión, para el cual se obtuvo un  $R^2$  que indica que los valores observados se ajustan a los simulados en un 88% con un valor de RMSE de 0.8051, lo cual se considera adecuado para el modelo de la situación actual de la red en estudio. De la misma forma al evaluar los resultados simulados y observados asociados a la velocidad, se evidenció que las diferencias encontradas no son significativas. El proceso de validación realizado permitió conocer la capacidad del modelo para generar resultados acordes a las mediciones evidenciadas en la red vial. El método usado fue la estimación del GEH en el cual arrojó resultados dentro de los rangos establecidos para un ajuste moderado.

Los resultados del modelo principal indican que, en condiciones típicas, existen corredores congestionados al largo de las vías e intercambiadores principales de los diferentes Municipios. Las velocidades evidenciadas a nivel de red están cerca de los 25 Km/hora para Bucaramanga y Floridablanca, mientras que para Girón y Piedecuesta estos valores llegan a 50 Km/hora, estas velocidades se derivan del promedio de las velocidades en la red, al analizar el valor de las desviaciones podemos evidenciar una alta variación de los valores simulados, lo cual es coherente al considerarse que el valor analizado corresponde a un promedio que considera para su cálculo segmentos con velocidades altas, no obstante como se pudo ver, en los corredores críticos las velocidades de la simulación se aproximan a las observadas en campo.

Los resultados obtenidos del modelo principal fueron la base para la evaluación de los escenarios de suministro de información, ya que, a partir de las condiciones típicas de la red del escenario principal, se efectuaron las comparaciones requeridas para evaluar los impactos derivados de la implementación de incidentes en la red, a la vez que se evaluaron las políticas de suministro de información al viajero ATIS.

Es importante considerar que el modelo propuesto es una estimación general del comportamiento real en el entorno del área metropolitana de Bucaramanga, sin embargo, el resultado obtenido puede mejorarse considerablemente al contar con una matriz de viaje actualizada por medio de información primaria que permita determinar las variaciones en los viajes OD, en los últimos 10 años. No obstante, el modelo presentado se comporta bien como una aplicación fuera de línea y puede mejorarse el poder predictivo del modelo mediante una recalibración de los parámetros usando datos en tiempo real.

## **5. Determinar del impacto de la penetración de la información suministrada al usuario en la redistribución de los flujos en una red**

Con el objetivo de determinar el impacto que tiene el suministro de información de tráfico al conductor en una red de transporte, se propusieron 7 diferentes escenarios para evaluar el rendimiento de la red ante diferentes grados de penetración de la información. A continuación, se muestra la metodología implementada, así como los resultados obtenidos y el análisis realizado.

### **5.1. Escenarios de evaluación de los efectos de la información al viajero en la redistribución de los viajes en el área de estudio**

Una vez construido, calibrado y validado el modelo principal de simulación y con el objetivo de determinar el impacto que produce la aceptación de información de tráfico por parte de los conductores, se generaron siete (7) réplicas del escenario de simulación de tráfico principal añadiendo elementos que permitieran simular los efectos de la información al viajero en la redistribución de los flujos de los diferentes municipios que conforman el área metropolitana de Bucaramanga.

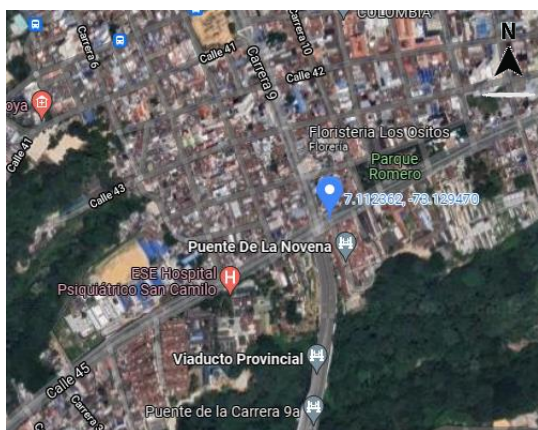
Para simular las condiciones de penetración de información en el área metropolitana, se propuso generar condiciones de tráfico tipo incidentes en diferentes puntos de la red vial propuesta, con el objetivo de entorpecer las condiciones de movilidad habituales en la red vial de los municipios estudiados, y a partir de estos eventos generar acciones orientadas a suministrar información en proporciones variables sobre desvíos a los conductores, informándoles sobre la novedad existente en la red y de esta manera poder evaluar la forma en que el uso de dicha información afecta las condiciones de movilidad del área de estudio.

Los incidentes fueron modelados según lo dispuesto en la herramienta Aimsun, como una acción que bloquea el área seleccionada y repercute en el comportamiento del tráfico en una sección; pueden representar por ejemplo un vehículo estacionado, un accidente, o cualquier evento que obstaculice el paso en determinado segmento de una sección. (Aimsun 20.1, 2017)

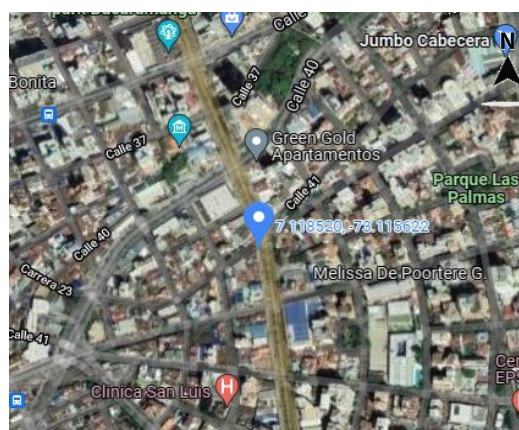
Para realizar la evaluación en el modelo se implementaron en total 7 incidentes en secciones, tres (3) incidentes en Bucaramanga, dos (2) en Floridablanca, uno (1) en Girón y uno (1) en Piedecuesta. Las secciones fueron seleccionadas con el fin de obstaculizar las vías principales y neurálgicas de cada municipio, lo que permitió estudiar la forma en que se afectaría la movilidad de la ciudad bajo las condiciones de tráfico implementadas y al adoptar diferentes escenarios de información al usuario, de forma que fue posible estudiar las bondades o deficiencias, provenientes de la implementación de los sistemas ATIS en el AMB. Las ubicaciones de los incidentes aplicados se muestran en la *Figura 46*.

### Figura 46

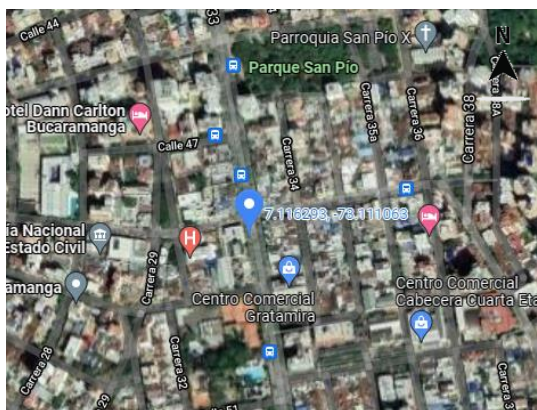
#### *Incidentes simulados en el Área Metropolitana de Bucaramanga*



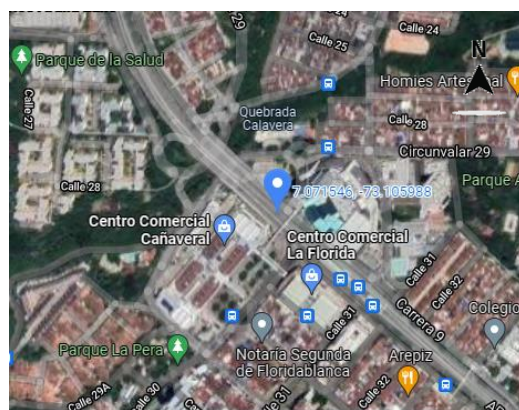
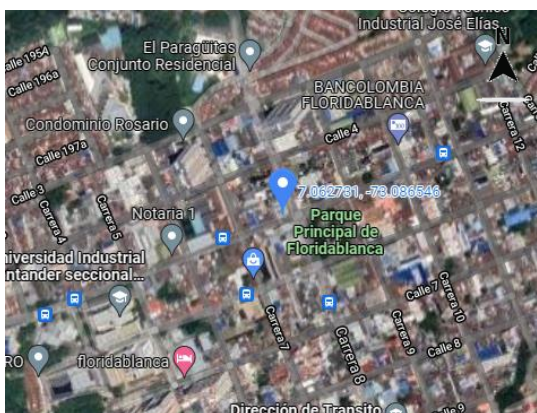
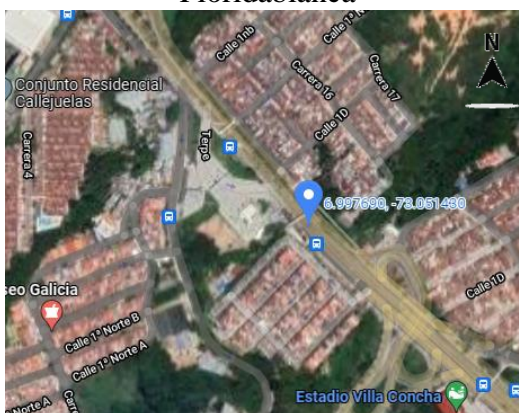
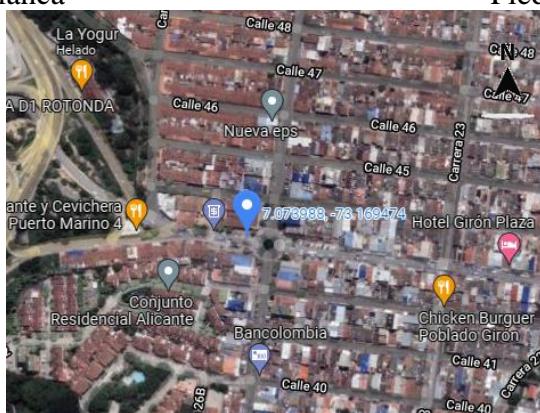
Calle 45 con Carrera 9 - Bucaramanga



Carrera 27 con Calle 41 - Bucaramanga



Carrera 33 con Calle 48 – Bucaramanga

Avenida Floridablanca con Calle 30 -  
FloridablancaAvenida Floridablanca con Calle 30 -  
FloridablancaAvenida San Gil Piedecuesta – Calle 4 -  
Piedecuesta

Calle 43 con Carrera 26 - Girón

*Nota. Elaboración propia con base en el Google Earth.*

Lo incidentes fueron implementados en el modelo en el periodo comprendido entre las 06:00 y 07:00 pm, una vez finalizó la ejecución del modelo se obtuvieron resultados de

velocidades, tiempos de demora, tiempos de viaje, longitudes de viaje, entre otros, lo cual permitió evidenciar sus impactos en el tráfico la zona.

Posteriormente, se procedió a activar políticas sobre el modelo orientadas a representar y estudiar los efectos que tiene la información dada al usuario por medio de ATIS en la movilidad de la red en estudio. La política seleccionada para tal fin consistió en desviar los vehículos a las vías aledañas implementando una acción de cierre de giro, acompañada a su vez por la implementación de señales de mensajería variable (VMS, por sus siglas en inglés) para informar a los usuarios sobre los incidentes y posibles rutas alternas.

La política seleccionada permite simular vehículos que, al encontrarse con un giro cerrado, calculan una nueva ruta para llegar a su destino, de esta forma al activar la política es posible evitar el accidente y sus efectos. Es así como mientras el cierre de giro se encuentre activo, se recalcularán las rutas y no será posible incluirlo en nuevos cálculos, a la vez que es posible seleccionar el nivel de cumplimiento de los cierres propuestos, lo cual permitió la construcción de los escenarios de suministro de información asignando las tasas de aceptación propuestas en el *Capítulo 3* para la política implementada, lo cual permitió estudiar sus efectos ante la aplicación eventual de un incidente en la red.

## **5.2. Análisis de los escenarios de evaluación de suministro de información propuestos.**

Habiendo ejecutado los escenarios de suministro de información propuestos y una vez se obtuvieron los resultados asociados al rendimiento de la red para cada uno de ellos, se procedió a identificar un análisis que permitiera evaluar de qué forma afecta la redistribución de los flujos ocasionada por el suministro información de tráfico al conductor en una determinada red.

En primer lugar, se realizó de un análisis estadístico descriptivo general a todos los datos recolectados y una vez se determinaron las características de cada uno de los escenarios, se

procedió a realizar un análisis de sensibilidad que constó de una comparación entre los resultados de la simulación del escenario principal, respecto a los siete (7) escenarios de simulación propuestos. La aplicación del análisis de sensibilidad permitió estudiar la forma en que los datos de entrada asignados a la simulación afectan los datos de salida generados por el modelo, con el propósito de identificar que variable o parámetros afectan significativamente los resultados, indicando la importancia de cada dato de entrada, en los resultados esperados. (Velasquez, 2011; Iooss & Saltelli, 2015)

Los métodos de análisis de sensibilidad se dividen principalmente en dos enfoques, el primero es el enfoque local, el cual permite evaluar pequeñas variaciones en los datos de entrada (por ejemplo, el cambio en un variable de interés) e identificar cuáles son los efectos que surgen en las salidas de la simulación. Este enfoque es determinista y se basa en las estimaciones de derivadas parciales del modelo en un punto específico del espacio de las variables de entrada. El segundo enfoque es el análisis de sensibilidad global el cual estudia el modelo como un todo considerando todas las posibles variaciones en las entradas, en lugar del estudio de un valor específico. Este enfoque se da en un marco probabilístico el cual considera las entradas como variables aleatorias con una distribución continua que refleja la incertidumbre, y genera salidas que también son variables aleatorias cuya distribución se desconoce. (Iooss & Saltelli, 2015)

El análisis de sensibilidad desarrollado para la presente investigación se basó en el enfoque local, debido a que el análisis buscado implicaba la variación de una única variable en los datos de entrada del modelo realizado, el cual como se mencionó de forma reiterada, corresponde a la tasa de penetración de la información de tráfico suministrada a los conductores. Con base en los datos obtenidos se construyeron tablas comparativas, a partir de las cuales se generaron gráficos y se calculó la diferencia entre los escenarios propuestos, con el objetivo de identificar las diferencias

entre los valores simulados. Adicionalmente se calculó el estadístico a partir del cual se compararon las simulaciones y se definió que tan cerca están los valores del escenario principal, respecto a los resultados obtenidos al modificar la simulación de referencia, lo cual permitió dar una medida absoluta del ajuste entre los escenarios propuestos. Es importante indicar que este ajuste no representa un valor de error, simplemente indica diferencias entre las simulaciones.

Como se mencionó, el análisis realizado incluyó la evaluación de diferentes porcentajes de aceptación de la información en el modelo principal desarrollado, con el objetivo de investigar en qué medida cambia el rendimiento de la red en términos de velocidades, cola media y tipos de demora y de viaje. La comparación se efectuó en un principio comparando los resultados del escenario principal (situación típica de movilidad del área de estudio) con el escenario base (implementación de un incidente con 0% de penetración de información), posteriormente se compararon los resultados de los escenarios con tasas de aceptación de 19%, 29%, 37%, 50%, 87% y 100% de penetración de la información, en contraste con el escenario base. En la Tabla 2, se indican los escenarios propuestos indicando el porcentaje de penetración propuesto para cada uno de ellos y una breve justificación. Los resultados obtenidos pueden consultarse en el siguiente capítulo.

### **5.3.Resultados**

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos y el análisis realizado a los diferentes escenarios propuestos, con el fin de evaluar cómo afecta la información brindada al usuario en la redistribución de los flujos del área metropolitana de Bucaramanga. Como se mencionó en el capítulo anterior, el modelo de simulación se evaluó conformando subredes para cada uno de los Municipios de Girón, Floridablanca, Piedecuesta y Bucaramanga, por tanto, con el propósito de facilitar la interpretación de la información, así como los efectos de los incidentes

y políticas implementados, los resultados también se presentan discreteando la información por Municipios.

Considerando que la información del análisis es extensa y se realiza un análisis similar para los diferentes Municipios, se presentan los resultados asociados principalmente a Bucaramanga ya que es la ciudad más importante del área metropolitana debido a que alberga mayor número de habitantes y cuenta con una extensión vial y urbana superior, adicionalmente es el centro de prestación de servicios más importante de la región, por lo cual se llevan a cabo una gran cantidad de viajes desde y hacia este municipio. La información relacionada con los municipios de Girón, Piedecuesta y Floridablanca puede consultarse en el *Apéndice U*.

Ya que el objetivo principal de la investigación era evaluar ¿cómo afecta la información brindada al usuario en la redistribución de flujos de la ciudad?, el análisis realizado comprende el estudio de los diferentes escenarios de penetración propuestos en el *Capítulo 3* y su comparación respecto a las condiciones típicas de movilidad representadas en el escenario principal. Es así como a continuación, se presentan los resultados y análisis realizados a los diferentes escenarios estudiados.

### ***5.3.1. Escenario principal V/S escenario con implementación de incidentes***

La primera evaluación realizada consistió en identificar cuál es el efecto de la implementación de las condiciones de tráfico tipo incidentes generadas para entorpecer las condiciones de movilidad habituales en la red en estudio, considerando que los usuarios no tienen acceso a esta información por lo cual siguen con sus rutas típicas, para lo cual se generó un nuevo escenario a partir de las condiciones ya establecidas en el escenario principal. A continuación, se presenta una primera comparación de los resultados obtenidos en cuanto a las condiciones de operación de los segmentos viales, velocidades, cola media, distancia total de viaje, tiempo de

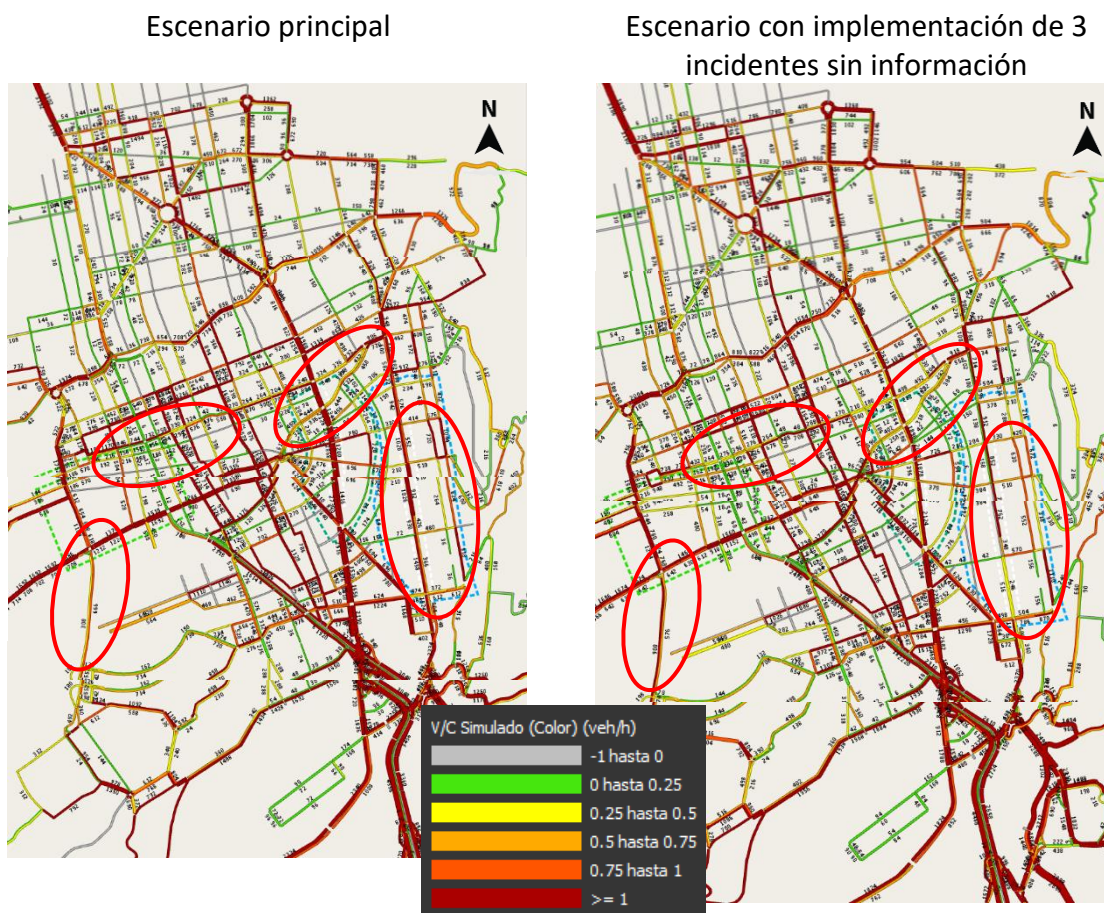
viaje y tiempos de demoras, respecto del escenario principal a nivel de la red global estudiada y acto seguido considerando las afectaciones sobre el área de influencia de la implementación del incidente.

#### **5.3.1.1. Resultados obtenidos para el análisis a nivel de red global**

La *Figura 47* muestra el resultado obtenido en la simulación para el flujo simulado, esta grafica permite entender las condiciones de operación de cada uno de los segmentos de la red vial en estudio. La imagen de la izquierda presenta los resultados del escenario principal y la imagen de la derecha el resultado del escenario con la implementación de los incidentes y en ausencia de información. Como puede verse en la leyenda, a medida que aumenta el flujo en la sección está cambiará de color desde verde a rojo, denotando este último una relación volumen/capacidad mayor a 1, lo cual indica que el flujo que transita por estas secciones es alto. Al evaluar el escenario en el cual se han implementado los incidentes, puede verse que, en la zona de influencia inmediata se evidencia lo que parece una disminución en los flujos que atraviesan los segmentos, lo cual ocurre debido a que al implementar el incidente el flujo se entorpece, provocando una interrupción en el flujo normal de tránsito de vehículos. A la vez, en algunos segmentos de las áreas más alejadas del incidente, se evidencia un aumento en los flujos.

**Figura 47**

*Flujo simulado para la ciudad de Bucaramanga, considerando el escenario principal y el escenario con incidentes y sin información*



*Fuente: Elaboración propia con base en software AIMSUN.*

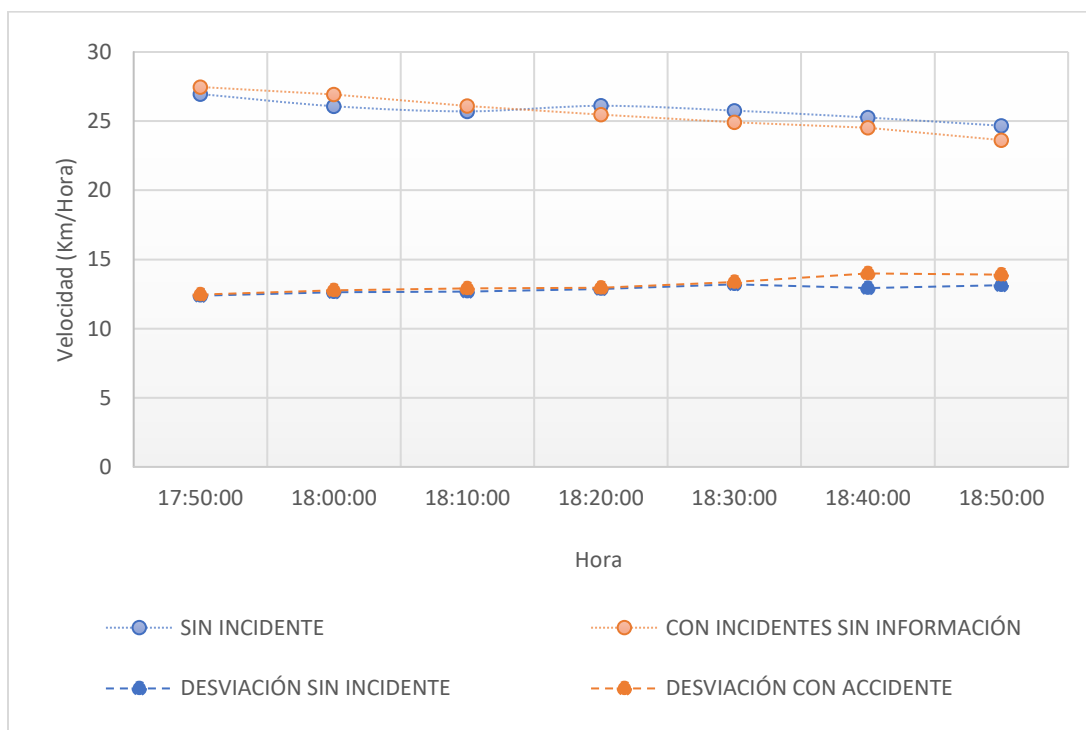
Otros análisis realizados incluyen la comparación entre el comportamiento de la velocidad promedio de todos los enlaces para el periodo total de la simulación evaluada para ambos escenarios. En la *Figura 48* se muestra el comportamiento de la variable velocidad para el periodo comprendido entre las 6:50 pm y las 07:00 pm, considerando el escenario sin implementación del incidente y el escenario con el incidente implementado y sin información al usuario. Como puede verse en el escenario principal (color azul) existe una tendencia a la disminución con algunas

variaciones de la velocidad en el tiempo, y al compararla con el comportamiento de la velocidad al aplicar los incidentes, puede verse que la velocidad presenta una tendencia a disminuir.

De la misma forma se presenta la desviación estándar de las mediciones obtenidas, con el objetivo de señalar que si bien el promedio de velocidad para la hora pico reporta un valor que parece alto respecto a las condiciones reales del municipio, esto se da debido a que se considera un promedio de la medición, el cual se ve afectado por algunos segmentos viales que no presentan congestión, mejorando el resultado global de la red.

### Figura 48

*Velocidad promedio del escenario principal y el escenario con incidentes sin información para la ciudad de Bucaramanga.*



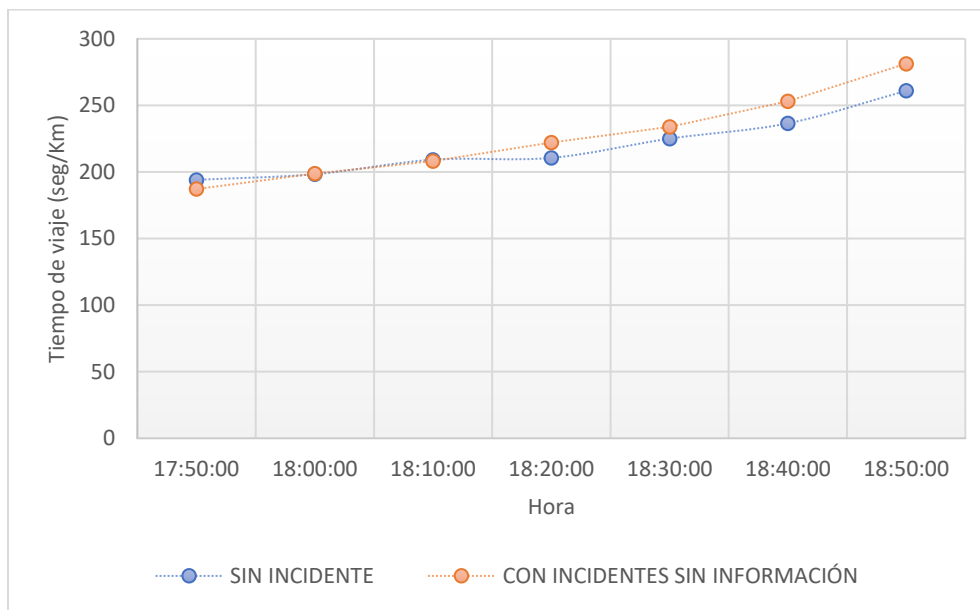
*Nota. Elaboración propia.*

El resultado obtenido debido a los incidentes implementados en la red, efectivamente entorpecen el tráfico, evidenciándose una disminución de la velocidad promedio de entre 3% a 5%. Si bien estos porcentajes parecieran no mostrar repercusiones negativas importantes, debe considerarse que corresponde al promedio total de las velocidades en la red en el marco de la implementación de tres incidentes aislados en 3 puntos diferentes de la red, por lo que las afectaciones generadas empiezan a cobrar mayor importancia. Así mismo, en el *Capítulo 5.3.1.2*, se presentan los resultados de los escenarios limitándolos al área de influencia definida para la implementación de los incidentes, y se muestran los efectos negativos ocasionados de forma directa.

De la misma forma el análisis realizado a la variable tiempo de viaje para los dos escenarios, mostró que para el escenario principal se evidencia que a medida que transcurre el tiempo de la simulación el tiempo de viaje va a aumentando, y para el escenario al que se le implementaron los incidentes, se encontró que se conserva la tendencia de aumento, sin embargo, el aumento en los tiempos de viaje son superiores a los obtenidos en el escenario principal, evidenciando un aumento en los tiempos de viaje en promedio de 7% en toda la red. La *Figura 49* presenta los resultados de la simulación.

**Figura 49**

*Tiempo de viaje del escenario principal y el escenario con incidentes sin información para la ciudad de Bucaramanga.*

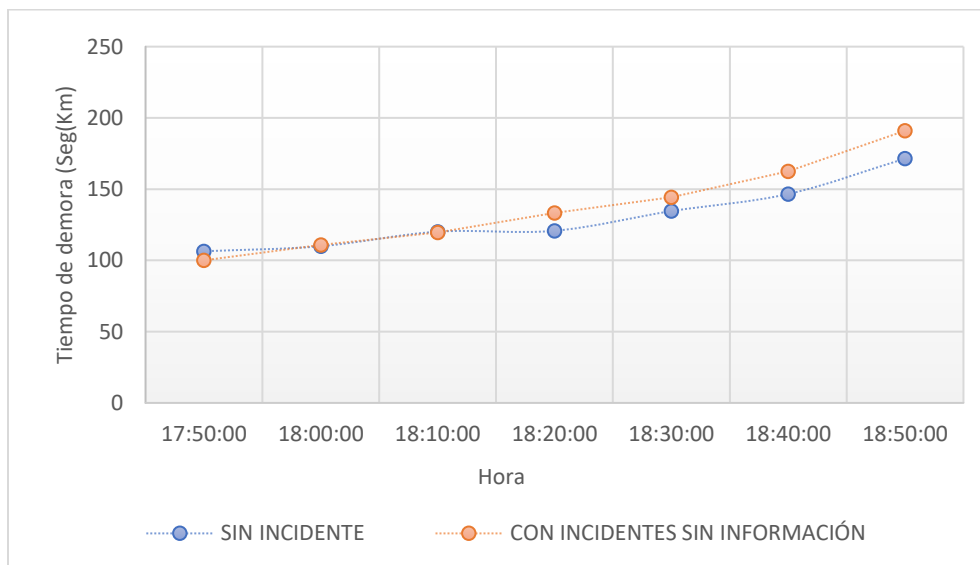


*Nota. Elaboración propia.*

Posteriormente se analizó el tiempo de demora de las simulaciones realizadas, el cual corresponde a la diferencia entre el tiempo de viaje esperado y el tiempo de viaje real de la simulación, siendo este el tiempo medio de demora por vehículo por kilómetro. Se encontró que para el escenario principal el tiempo de demora aumenta a medida que avanza la simulación; para el caso del escenario con implementación de incidentes se encontró que existe también un aumento en el tiempo de demora de la red, sin embargo, este aumento es mayor al evidenciado en el escenario principal en un promedio de 10%. La *Figura 50* muestra los resultados obtenidos para los dos escenarios de simulación.

**Figura 50**

*Tiempo de demora de simulación del escenario principal y el escenario con incidentes sin información para la ciudad de Bucaramanga.*

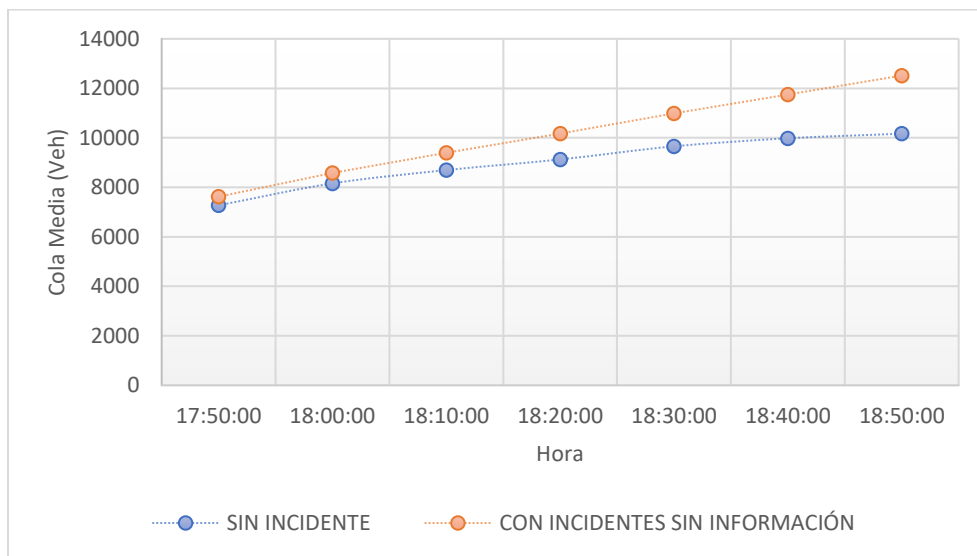


*Nota. Elaboración propia.*

Otro variable estudiada fue la cola media de las simulaciones. Se encontró que el escenario principal tiene una tendencia a aumentar la cola media a medida que avanza el tiempo, comportamiento que se mantiene al compararlo con el escenario en el que se implementan los incidentes, sin embargo, como se puede ver en la *Figura 51*, el aumento evidenciado en comparación con el escenario principal es de un promedio de 15% para las colas en la simulación para toda la red.

**Figura 51**

*Cola media del escenario principal y el escenario con incidentes sin información para la ciudad de Bucaramanga.*



*Nota. Elaboración propia.*

Como puede verse, la implementación de los incidentes en el escenario de simulación tiene un impacto a nivel de la red global, el cual se evidenció en los resultados obtenidos para cada una de las variables estudiadas ya sea en mayor o menor medida, pero mostrando en todos los casos una degradación de las condiciones de movilidad de la red, lo cual resulta bastante intuitivo y lógico del comportamiento de una red urbana de transporte en condiciones reales.

### **5.3.1.2. Resultados a nivel de la zona de influencia de aplicación del incidente**

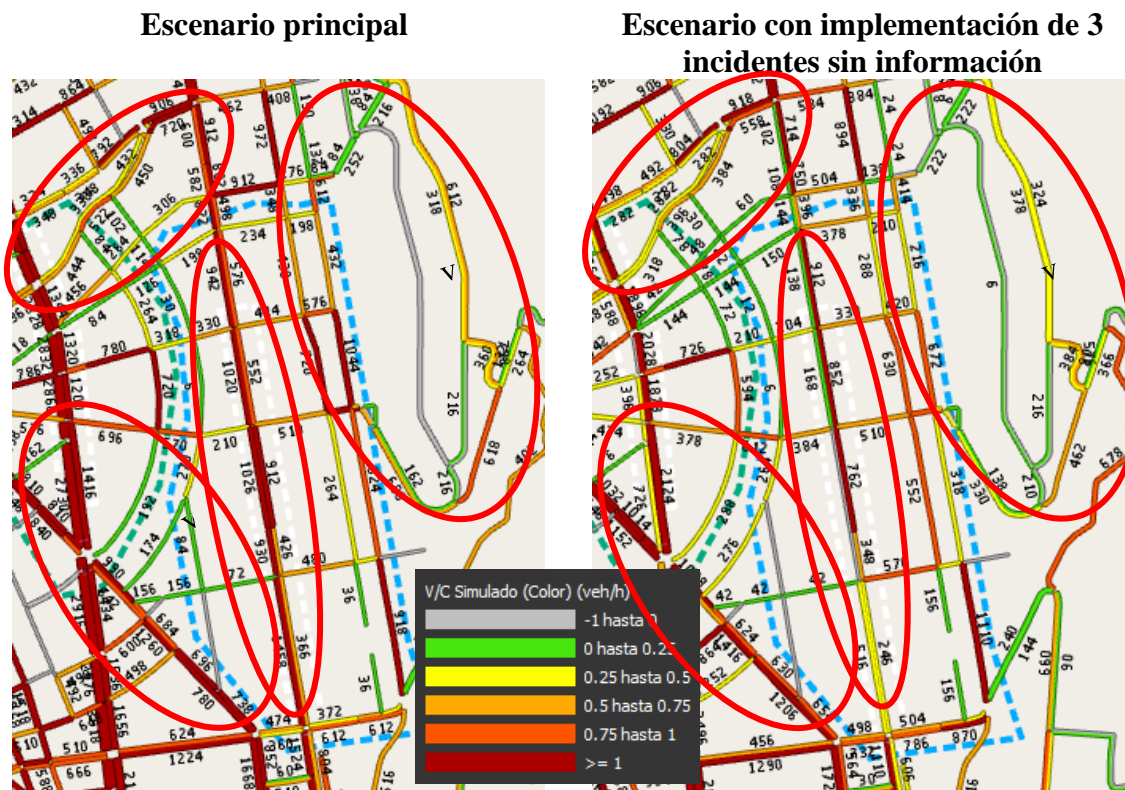
Habiendo estudiado el comportamiento a un nivel global de la red, se consideró pertinente estudiar los efectos de la implementación de los incidentes, en sus zonas de influencia inmediata. Como se mencionó anteriormente para la ciudad de Bucaramanga se implementaron 3 incidentes, a continuación, se presentarán los resultados obtenidos para la zona de influencia ubicada en la

carrera 33 con calle 48 y la información restante de los dos puntos adicionales puede consultarse en el *Apéndice U* del presente documento.

Como se mencionó anteriormente las zonas en las que se implementaron los incidentes son puntos neurálgicos para la ciudad en términos de movilidad, considerando que se ubican en las vías principales de conexión y experimentan índices altos de congestión. Por ejemplo, al analizar el escenario principal mostrado en la *Figura 52*, se observa que existen segmentos con flujos vehiculares muy altos en el intervalo de modelación sin incidente, y al comparar con el escenario de implementación del incidente y sin suministro de información, se puede observar el mismo fenómeno encontrado a nivel de red, los segmentos afectados por el incidente pierden el flujo a causa de la restricción de movilidad que el incidente genera, y se pueden observar como las vías aledañas empiezan a acumular mayor flujo.

**Figura 52**

*Diagrama de flujo simulado zona de influencia incidente carrera 33 con calle 48, considerando el escenario principal y el escenario con incidentes y sin información.*

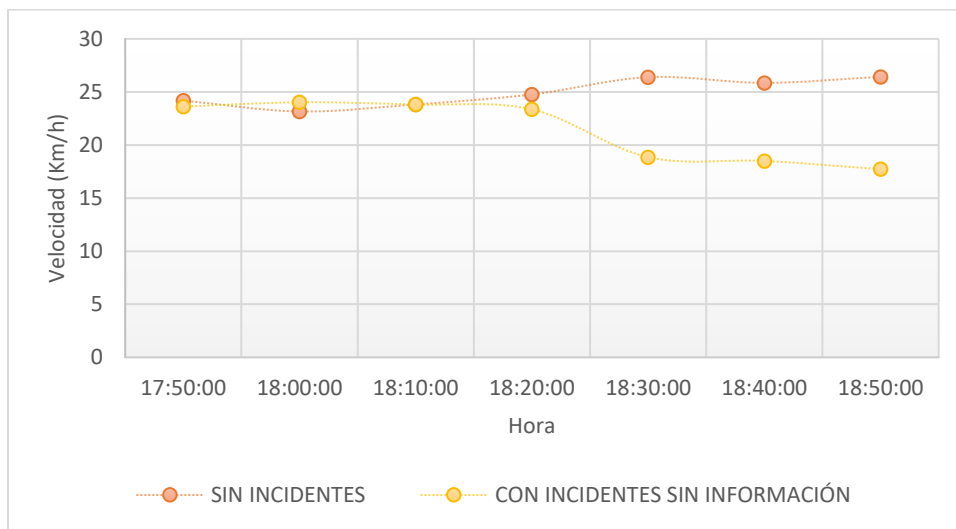


*Nota. Elaboración propia con base en software AIMSUN*

La situación descrita puede soportarse en el análisis de las demás variables asociadas a la zona de influencia en estudio, por ejemplo, la *Figura 53* presenta los resultados de velocidad promedio del escenario principal, realizando una comparación con la velocidad promedio obtenida del escenario con la implementación del incidente y sin suministrar información del evento al usuario. Como puede verse, la velocidad promedio para el escenario principal en la zona de influencia oscila en los 25 km/hora, sin embargo, al implementar el incidente la velocidad disminuye paulatinamente hasta llegar a 15 Km / hora en el intervalo en estudio, esto significa una disminución promedio de 38% entre los escenarios.

**Figura 53**

*Velocidad promedio del escenario principal y el escenario con incidentes sin información zona de influencia carrera 33 con calle 48.*

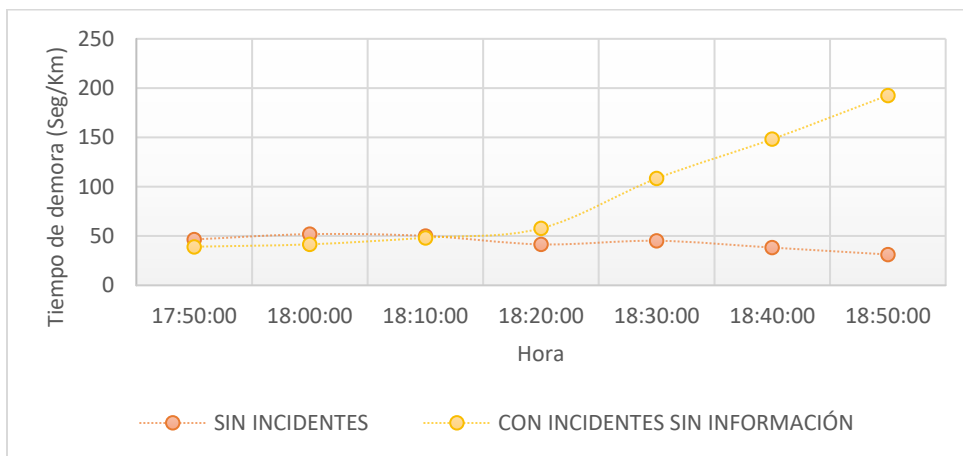


*Nota. Elaboración propia con base en software AIMSUN*

Otras variables que evidencian la degradación de las condiciones de movilidad en la zona de influencia son el tiempo de demora, la cola media y el tiempo de viaje. La *Figura 54* muestra el claro incremento en los tiempos de demora del escenario al aplicar el incidente, puede verse que las demoras presentadas en el escenario aumentan en promedio un 68%. Al analizar la *Figura 55* muestra el comportamiento de la cola media en la zona de influencia, para la cual se obtuvo un aumento del 66% de vehículos en cola a lo largo del periodo estudiado. Y finalmente los tiempos de viajes asociados a los escenarios indican un aumento promedio de 68% como se puede ver en la *Figura 56*.

**Figura 54**

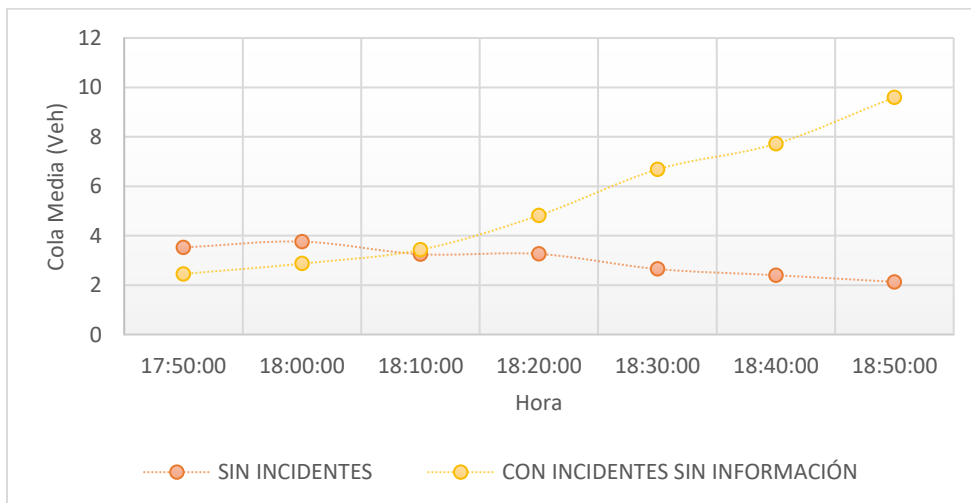
*Tiempo de demora del escenario principal y el escenario con incidentes sin información zona de influencia carrera 33 con calle 48.*



*Nota. Elaboración propia con base en software AIMSUN*

**Figura 55**

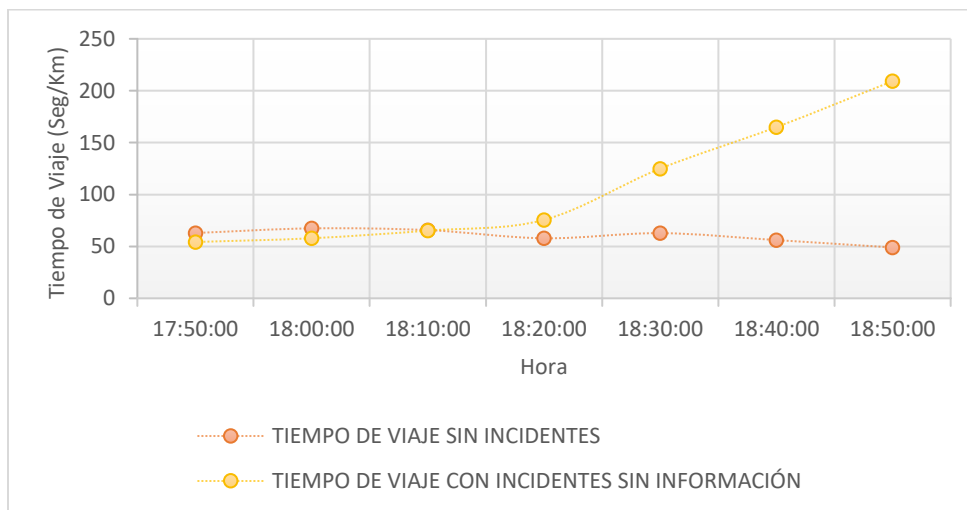
*Cola Media del escenario principal y el escenario con incidentes sin información zona de influencia carrera 33 con calle 48.*



*Nota. Elaboración propia con base en software AIMSUN*

**Figura 56**

*Tiempo de viaje del escenario principal y el escenario con incidentes sin información zona de influencia carrera 33 con calle 48.*



*Nota. Elaboración propia con base en software AIMSUN*

La evaluación del escenario con implementación de incidentes, pero sin aplicación de información, se propuso con el fin de establecer un punto de referencia para evaluar los escenarios de penetración propuesta y de esta forma determinar si luego de desmejorar las condiciones en la red, se evidencian beneficios al proveer a los usuarios de información de tráfico a partir de tecnologías ATIS, o si por el contrario este tipo de estrategias no es adecuada para el área metropolitana de Bucaramanga. A continuación, se presentan los resultados derivados de esta evaluación.

### **5.3.2. Evaluación de los escenarios de penetración de la información propuestos**

Como se mencionó en el *Capítulo 3*, se propusieron 7 diferentes escenarios para evaluar los efectos de la penetración de la información en la red del área metropolitana de Bucaramanga, basándose en los resultados obtenidos en la encuesta desarrollada. Este capítulo presenta los

resultados más relevantes obtenidos en el análisis realizado. Los escenarios evaluados son los siguientes:

1. Escenario 0 (Base) - Tasa de aceptación de la información de tráfico: 0%
2. Escenario 100 (Referencia) - Tasa de aceptación de la información de tráfico: 100%
3. Escenario 1 (Medio) - Tasa de aceptación de la información de tráfico: 50%
4. Escenario 2 (Optimista) - Tasa de aceptación de la información de tráfico: 87%
5. Escenario 3 (Realista 1) - Tasa de aceptación de la información de tráfico: 29%
6. Escenario 4 (Realista 2) - Tasa de aceptación de la información de tráfico: 19%
7. Escenario 6 (Realista 3) - Tasa de aceptación de la información de tráfico: 37%

El escenario 0 corresponde al escenario que se evaluó en el apartado anterior, en el cual se simulan las condiciones típicas de la red bajo la influencia de incidentes de tráfico, sin brindar al usuario información de estos, lo cual corresponde al escenario base con una tasa de aceptación de la información de 0%. El objetivo en esta etapa era indagar sobre los efectos que tiene la penetración de la información en la red, implementando las políticas que permiten mitigar los impactos del incidente, variando la tasa de aceptación de la información de tráfico según los escenarios mencionados.

#### **5.3.2.1. Resultados obtenidos para el análisis a nivel de red global**

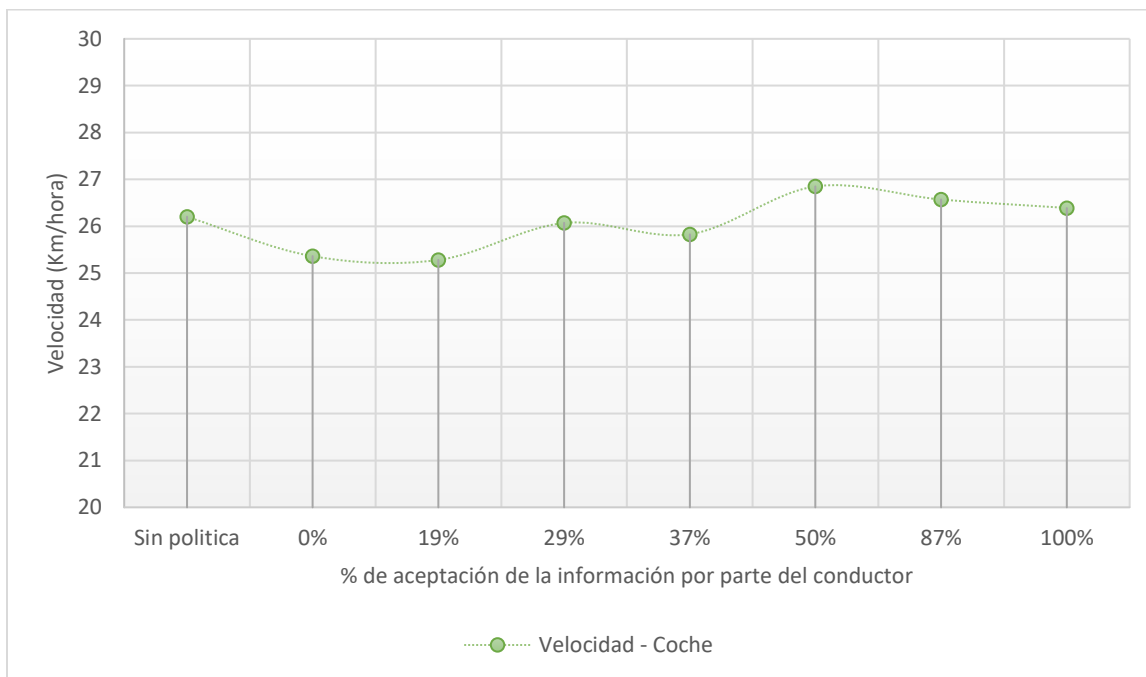
La *Figura 57* muestra los resultados de velocidad obtenidos a nivel de red para la ciudad de Bucaramanga. Al analizar el escenario realista No 1, encontramos que al dotar al 19% de los usuarios con información sobre el incidente no se evidencia una diferencia respecto al escenario base en estudio, al estudiar el escenario realista No 2, encontramos que existe un aumento en la velocidad promedio de la red de 2.7%, mientras que para el escenario realista No 3 encontramos que se mantiene el mejoramiento en la velocidad de la red, sin embargo respecto al escenario base

esta solamente corresponde a un 2.1%. Al analizar el escenario medio, encontramos que existe un aumento de 5.5% en la velocidad respecto al escenario base, lo cual corresponde al mayor aumento evidenciado en los escenarios. Para el escenario optimista el porcentaje de mejora es de 4.6% y para el escenario de referencia el porcentaje de mejora respecto al escenario base es de 3.9%.

El análisis limitado a esta variable nos indica que a medida que aumenta la tasa de aceptación de información por parte de los usuarios, se evidencia una mejora en la velocidad a nivel de la red, sin embargo, aun cuando se evidencia en los escenarios una tendencia a mejorar las condiciones de velocidad respecto a las mostradas en el escenario base (a excepción del escenario realista No 1), para los escenarios con un nivel de aceptación superior al 50% se denota una disminución en las bondades evidenciadas con el suministro de información. Autores como (Storch et al., 2020) explican que este comportamiento se da ya que los proveedores de información indican una ruta alternativa a la ruta congestionada, está información es recibida por los usuarios quienes migran en conjunto a la nueva ruta produciendo un pico de flujo y congestionando la nueva ruta sugerida, así el usuario identifica esta nueva ruta como congestionada y la evitará en futuros recorridos, dando paso así al llamado bloqueo informativo. Otra posibilidad evidenciada es que la ruta sugerida como alternativa, no cuente con una capacidad similar a la ruta inicial, lo cual generará un aumento en los tiempos de viaje a medida que la capacidad es superada por el número de usuarios que toman la alternativa sugerida.

**Figura 57**

*Velocidad promedio según el porcentaje de información aceptado por el usuario, para la ciudad de Bucaramanga.*



*Nota. Elaboración propia con base en software AIMSUN*

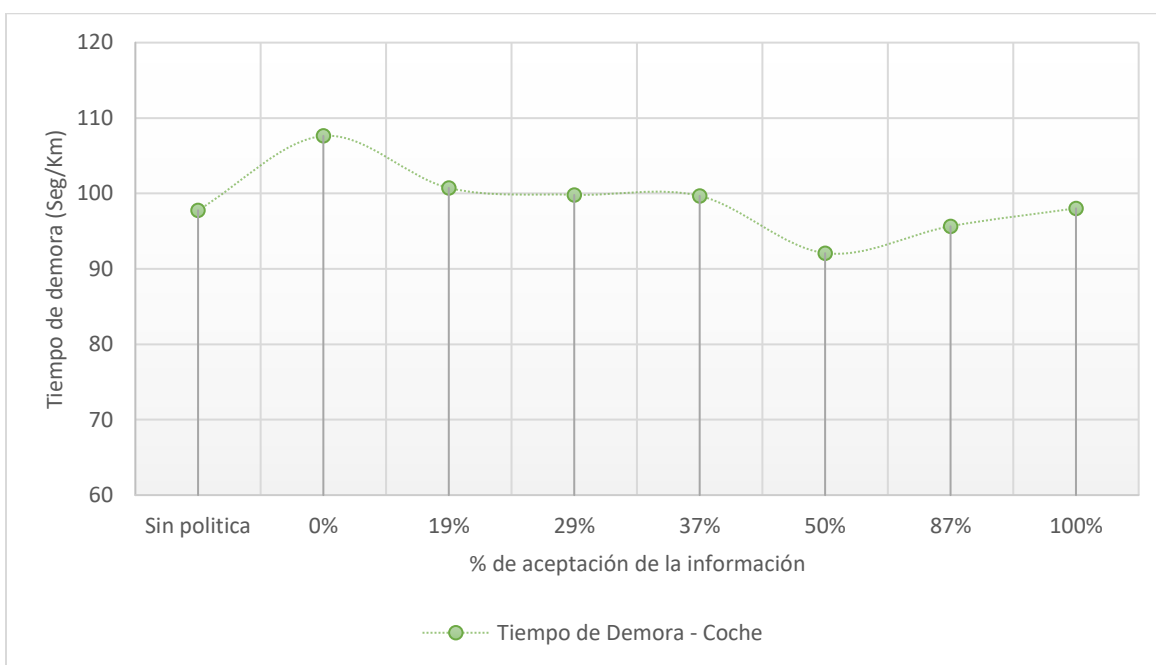
El tiempo de demora obtenido para los distintos escenarios muestran una disminución en las demoras respecto al escenario base sin incidentes. Para el escenario realista No 1 se evidenció que existió una disminución de 6.8% en los tiempos de demora, mientras que para el escenario realista No 2 la disminución fue del 7.8% y para el escenario realista No 3 es de 8%. El tiempo de demora obtenido para el escenario medio es 17% mayor al escenario base, mientras que para el caso del escenario optimista la disminución de la demora es del 12.5% y para el escenario de referencia es de 9.8%.

La *Figura 58* muestra gráficamente los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios, mostrando una tendencia la disminución de los tiempos de demora en los escenarios

de simulación a medida que aumenta el suministro de información a los usuarios. Se evidencia que una vez se llega al escenario medio, las mejoras presentadas en los tiempos de viajes empiezan a disminuir, sin embargo, aún se relacionan mejoras significativas con relación al escenario base.

### Figura 58

*Tiempo de demora según el porcentaje de información aceptado por el usuario, para la ciudad de Bucaramanga.*



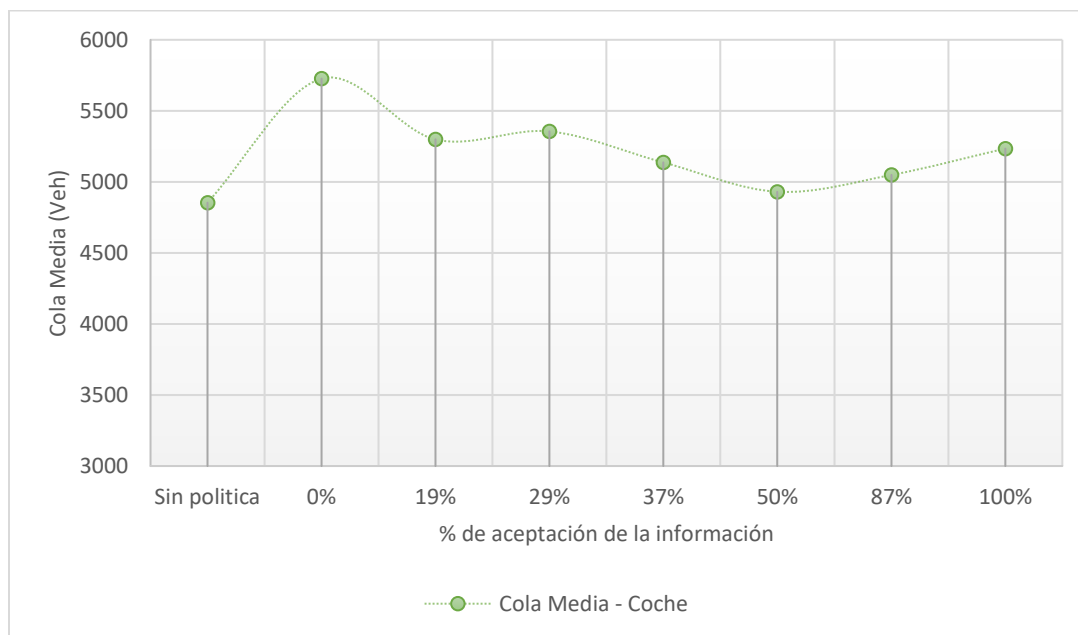
*Nota. Elaboración propia con base en software AIMSUN*

La cola media evidenciada en los escenarios muestra una disminución en referencia con el escenario base. Por ejemplo, para los escenarios realista 1, 2 y 3, se evidencia una disminución de 8%, 7% y 11.5%, respectivamente. Al analizar el escenario medio se encontró una disminución de 16.1% siendo esta la mayor reducción encontrada para los escenarios según su tasa de aceptación. El escenario óptimo presenta una disminución en la cola media de 13.4%, mientras que para el escenario de referencia la disminución es de 9.4%.

Como puede verse, el análisis de la *Figura 59* evidencia que existe una tendencia a la disminución de las colas en la red global de Bucaramanga a medida que aumenta la tasa de aceptación de la información, sin embargo, aunque aún se evidencian bondades en la disminución de colas respecto al escenario base al aumentar la tasa de aceptación por encima del escenario medio, éstas reducciones son menores comparadas con respecto al escenario medio simulado.

### Figura 59

*Cola media según el porcentaje de información aceptado por el usuario, para la ciudad de Bucaramanga.*



*Nota. Elaboración propia con base en software AIMSUN*

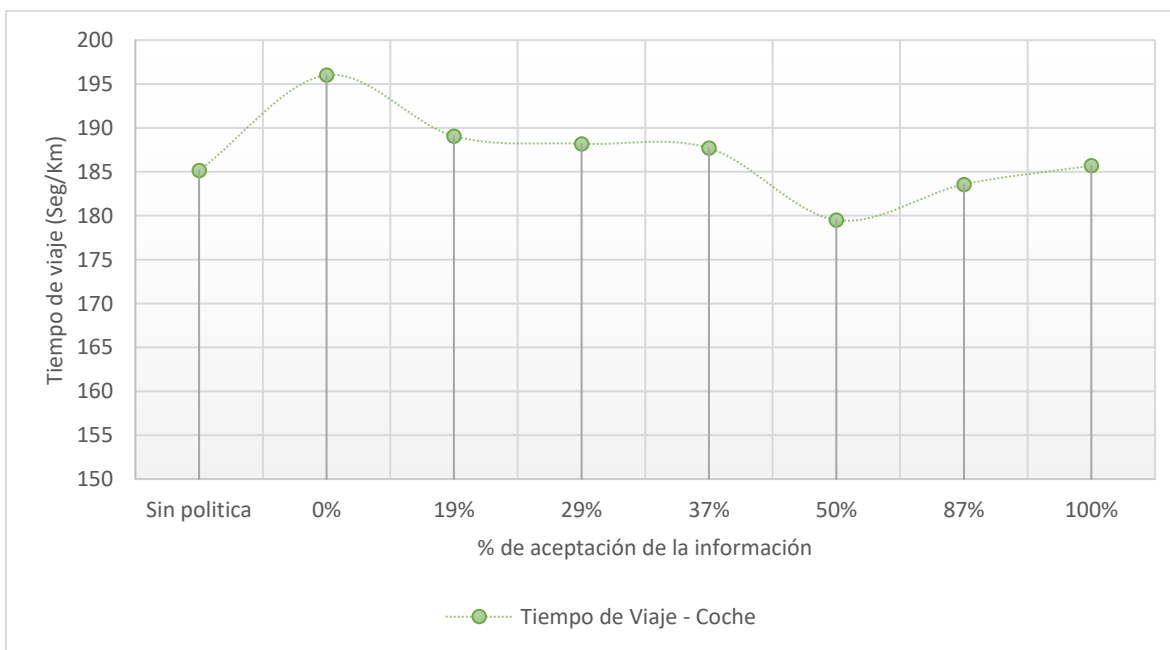
Al analizar los resultados asociados a los tiempos de viaje de los escenarios en estudio, se evidencia que, al aumentar la tasa de aceptación de la información de tráfico, disminuyen los tiempos de viaje evidenciados para cada uno de los modelos en estudio. Es así como para el escenario realista No 1 se tiene una disminución en los tiempos de viaje de 3.7%, para el escenario realista 2 de 4.1% y para el escenario realista No 3 la disminución fue de 4.4%. Al analizar el

escenario medio se encontró una disminución de 9.2%, mientras que para el escenario optimista fue de 6.8% y para el escenario de referencia es de 5.6%.

Como puede verse en la *Figura 60*, el comportamiento en la distribución de los tiempos de viaje para los diferentes escenarios muestra que a medida que la tasa de aceptación aumenta, los usuarios experimentan tiempos de viaje menores, sin embargo, este comportamiento se mantiene hasta llegar al escenario medio, de la misma forma en que se evidenció para las demás variables estudiadas. Para los escenarios optimista y de referencia, se evidencia una disminución en los beneficios obtenidos en los tiempos de viaje, a medida que aumenta la tasa de aceptación por encima de 50%, sin embargo, aún se evidencian beneficios respecto al escenario base.

### Figura 60

*Tiempo de viaje según el porcentaje de información aceptado por el usuario, para la ciudad de Bucaramanga.*



*Nota. Elaboración propia con base en software AIMSUN*

Con base en las variables analizadas es posible demostrar que los efectos del incidente y la penetración de la información se extiende en toda la red. Las estimaciones de su impacto se evidencian en el comportamiento resultante de la demanda. Con base en el análisis realizado fue posible demostrar que suministrar información al usuario puede mejorar las condiciones de movilidad de la red estudiada, y que estas mejoras aumentan proporcionalmente al aumento en la tasa de aceptación de la información, hasta llegar al escenario medio, en donde para valores superiores se evidencia que las bondades del suministro de información disminuyen a medida que sigue aumentando la aceptación por parte de los usuarios.

Los resultados antes presentados se derivan del análisis comparativo realizado, a partir del cual se construyeron diferentes cuadros comparativos con el objetivo de agrupar la información relevante para su análisis. En la *Tabla 26* se presenta la agregación de los resultados a nivel total de red obtenidos para las variables de velocidad, tiempo de viaje, tiempo de demora y cola media, para los diferentes vehículos incluidos en el modelo. La información detallada sobre este análisis y las demás tablas que soportan los resultados aquí expuestos se presentan en el *Apéndice U*.

**Tabla 26**

*Resultados de velocidades para cada uno de los escenarios de penetración de la información propuestos*

| <b>Serie Temporal</b>            | <b>Sin política</b> | <b>0%</b> | <b>19%</b> | <b>29%</b> | <b>37%</b> | <b>50%</b> | <b>87%</b> | <b>100%</b> |
|----------------------------------|---------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Cola Media – Todos (Veh)</b>  | 8073                | 9819      | 8919       | 8675       | 8452       | 8321       | 8301       | 8618        |
| <b>Cola Media – Bus (Veh)</b>    | 3081                | 3906      | 3467       | 3163       | 3181       | 3243       | 3115       | 3224        |
| <b>Cola Media – Coche (Veh)</b>  | 4854                | 5727      | 5298       | 5355       | 5137       | 4931       | 5049       | 5234        |
| <b>Cola Media – Camión (Veh)</b> | 138                 | 186       | 153        | 156        | 134        | 147        | 137        | 160         |

|   |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>Tiempo de Demora – Todos (Seg/Km)</b>  | 130 | 143 | 139 | 131 | 129 | 126 | 121 | 131 |
| <b>Tiempo de Demora – Bus (Seg/Km)</b>    | 247 | 267 | 270 | 242 | 232 | 243 | 209 | 248 |
| <b>Tiempo de Demora – Coche (Seg/Km)</b>  | 98  | 108 | 101 | 100 | 100 | 92  | 96  | 98  |
| <b>Tiempo de Demora – Camión (Seg/Km)</b> | 84  | 105 | 102 | 81  | 86  | 84  | 83  | 84  |
| <b>Tiempo de Viaje – Todos (Seg/Km)</b>   | 218 | 232 | 228 | 220 | 217 | 214 | 209 | 219 |
| <b>Tiempo de Viaje – Bus (Seg/Km)</b>     | 339 | 360 | 363 | 333 | 324 | 335 | 300 | 340 |
| <b>Tiempo de Viaje – Coche (Seg/Km)</b>   | 185 | 196 | 189 | 188 | 188 | 180 | 184 | 186 |
| <b>Tiempo de Viaje – Camión (Seg/Km)</b>  | 155 | 176 | 173 | 152 | 157 | 155 | 154 | 154 |
| <b>Velocidad – Todos (Km/hora)</b>        | 26  | 25  | 25  | 26  | 26  | 27  | 27  | 26  |
| <b>Velocidad – Bus (Km/hora)</b>          | 25  | 24  | 24  | 25  | 25  | 25  | 26  | 25  |
| <b>Velocidad – Coche (Km/hora)</b>        | 26  | 25  | 25  | 26  | 26  | 27  | 27  | 26  |
| <b>Velocidad – Camión (Km/hora)</b>       | 35  | 34  | 33  | 36  | 35  | 35  | 34  | 35  |

---

*Nota. Elaboración propia*

### **5.3.2.2.Resultados a nivel de la zona de influencia de aplicación del incidente**

Habiendo analizado el comportamiento general de la red, se buscó ahondar más en el comportamiento de los usuarios en la zona de influencia a la aplicación del incidente, con el objetivo de identificar posibles variaciones en el comportamiento debido a la escala de estudio. Retomando nuevamente el ejemplo de la Carrera 33 con calle 48, a continuación, se presentan los principales resultados obtenidos de la simulación.

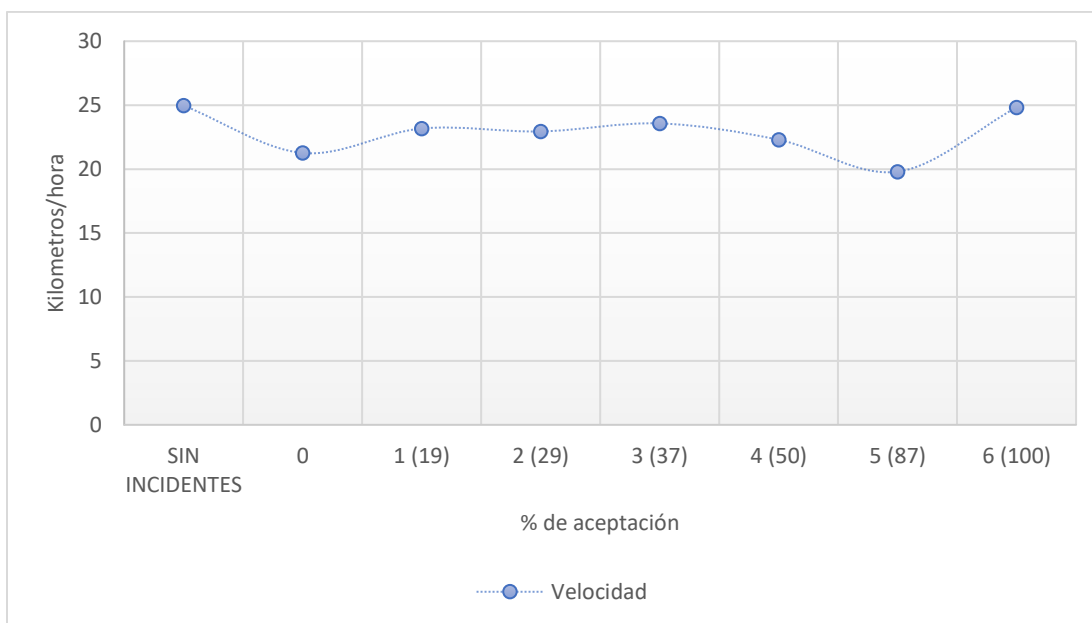
La *Figura 61* presenta los resultados promedio de velocidad para cada uno de los escenarios estudiados durante el periodo en estudio. Como se mencionó en el apartado anterior, al implementar el incidente en la red se denota una clara disminución en las condiciones de velocidad en la zona de estudio. Considerando este primer escenario como el escenario base para la comparación de los resultados respecto a los escenarios que incluyen el suministro de información a los usuarios en diferentes proporciones. Se encontró que para el escenario realista No 1 se evidencio una mejora en las velocidades de 8% y para el escenario realista No 2 de 7%, mientras que para el escenario realista No 3 se evidencia un aumento en las velocidades de operación promedio de 10%. Para el escenario medio se evidenció que existe un aumento en la velocidad de 5%, sin embargo, este es menor al evidenciado en el escenario realista No 3, Para el caso del escenario optimista se evidencia una disminución en la velocidad de 7% respecto al escenario base, en este sentido podemos evidenciar que el suministro de información no es favorable para el usuario.

Para el escenario de referencia en el que el 100% de los usuarios conocen la información se encontró que existe un aumento en la velocidad de 14%, este comportamiento se deriva de que cuando se suministra al 100% de los conductores información sobre el incidente, nos encontramos con que ninguno de los usuarios toma en consideración rutas que atraviesen ese segmento, por lo

cual se eliminan los pares OD que atravesaban estos segmentos y la demanda se redistribuye en los pares OD restantes. Es así como al analizar el grafico podemos observar que el escenario de referencia tiene valores de velocidad muy cercanos a los valores del escenario principal, cuando no se había implementado aún el incidente en estudio.

### Figura 61

*Velocidad de los escenarios estudiados según el porcentaje de información aceptado por el usuario, zona de influencia carrera 33 con calle 48.*



*Nota. Elaboración propia con base en software AIMSUN*

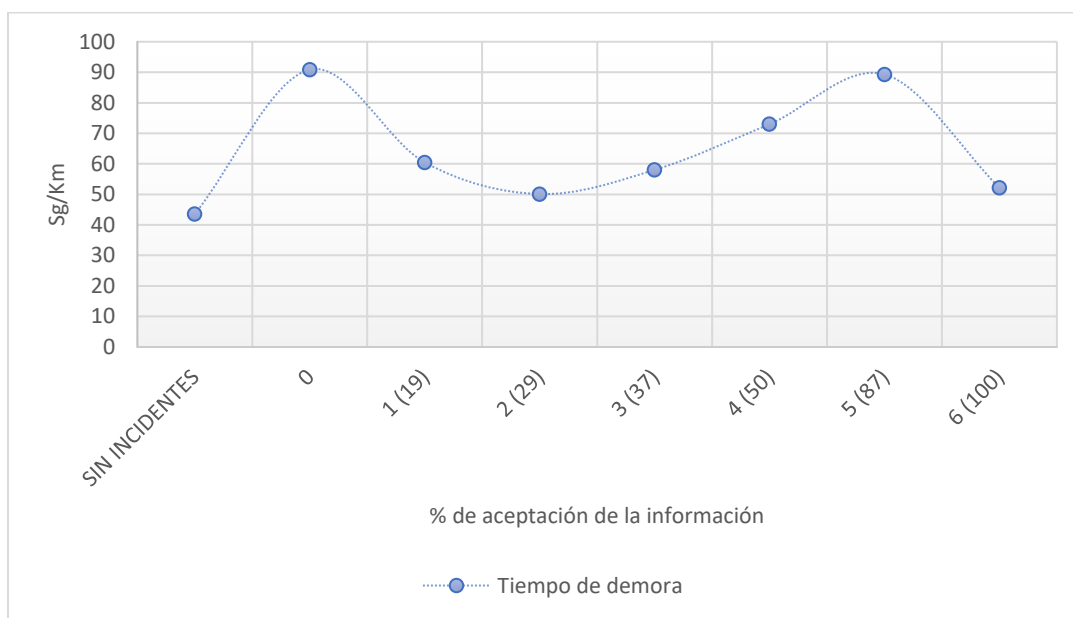
En cuanto al tiempo de demora se encontró que para el escenario realista 1 existe una disminución el tiempo de 50% en comparación con el escenario base, mientras que para el escenario realista No 2 es de 21%, para el escenario realista No 3 es de 44%, para el escenario medio de 19%, para el escenario optimista es de 2%, mientras que para el escenario de referencia es de 74%. Esta variable tiene un comportamiento muy similar al que se ha venido evidenciado en cuanto al aumento en la tasa de aceptación de la información, como se evidencia en la *Figura 62*,

a medida que aumenta la aceptación de la información el tiempo de demoras disminuye siendo el punto más alto de esta disminución el suministro de información a una tasa del 29% a partir de allí aún cuando se sigue viendo mejoras en las demoras, estas no son tan significativas y a medida que se aumenta la aceptación por parte de los usuarios, los beneficios evidenciados en el tiempo de demora disminuyen.

De forma adicional una vez más como se vio en la variable de velocidad, se evidencia que cuando el total de los usuarios conocen la información, el valor de las demoras evidenciadas es muy similar al del escenario sin incidentes, lo cual como se explicó anteriormente se debe a la eliminación de las rutas que involucran la obstrucción generando así una mejora en las condiciones de movilidad del área inmediata de aplicación.

### Figura 62

*Tiempo de demora de los escenarios estudiados según el porcentaje de información aceptado por el usuario, zona de influencia carrera 33 con calle 48.*

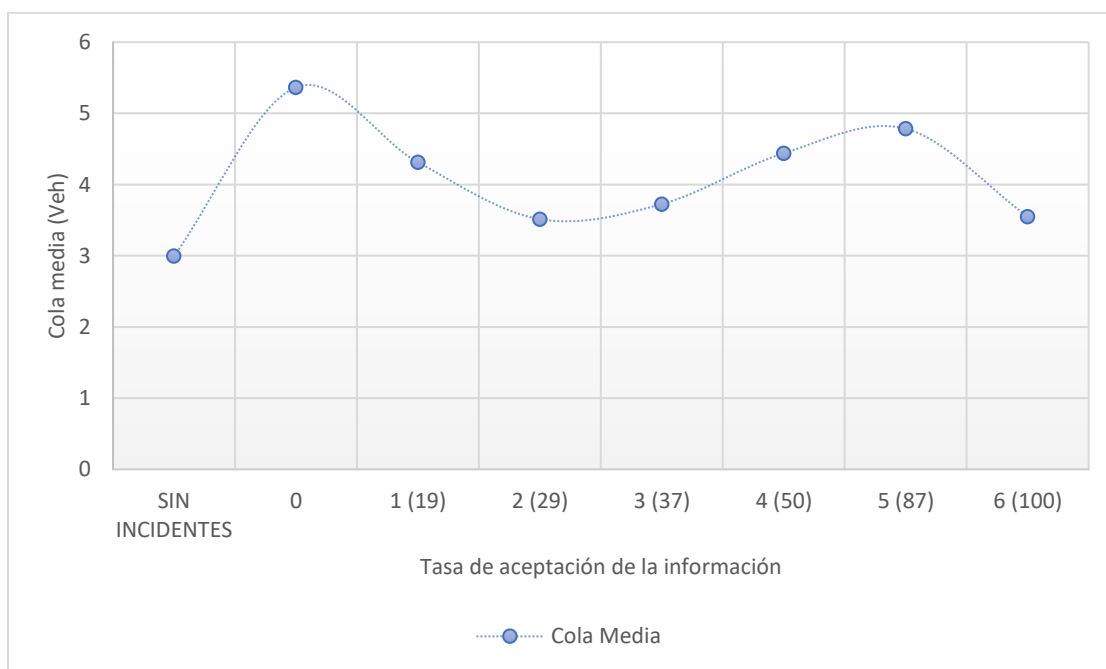


*Nota. Elaboración propia con base en software AIMSUN*

El análisis de la variable de cola media mostrado en la *Figura 63*, permite evidenciar que existe una disminución del 24% para el escenario realista No 1 en comparación del escenario base, para el escenario realista 2 esta disminución es de 53%, para el escenario realista No 3 es de 21%, para el medio de 12% y para el escenario de referencia es de 51%. Nuevamente se evidencia que existe un aumento en la medida que se aumenta la tasa de aceptación de la información llegando al punto de inflexión a una tasa de aceptación de 29%, en donde al seguir aumentando la aceptación de la información por parte de los usuarios se siguen evidenciando mejoras en menor medida. Para el escenario de referencia, nuevamente se evidencian las mejoras encontradas debido a la exclusión de rutas OD del análisis y la redistribución de la demanda en la red.

### Figura 63

*Cola Media de los escenarios estudiados según el porcentaje de información aceptado por el usuario, zona de influencia carrera 33 con calle 48.*



*Nota. Elaboración propia con base en software AIMSUN*

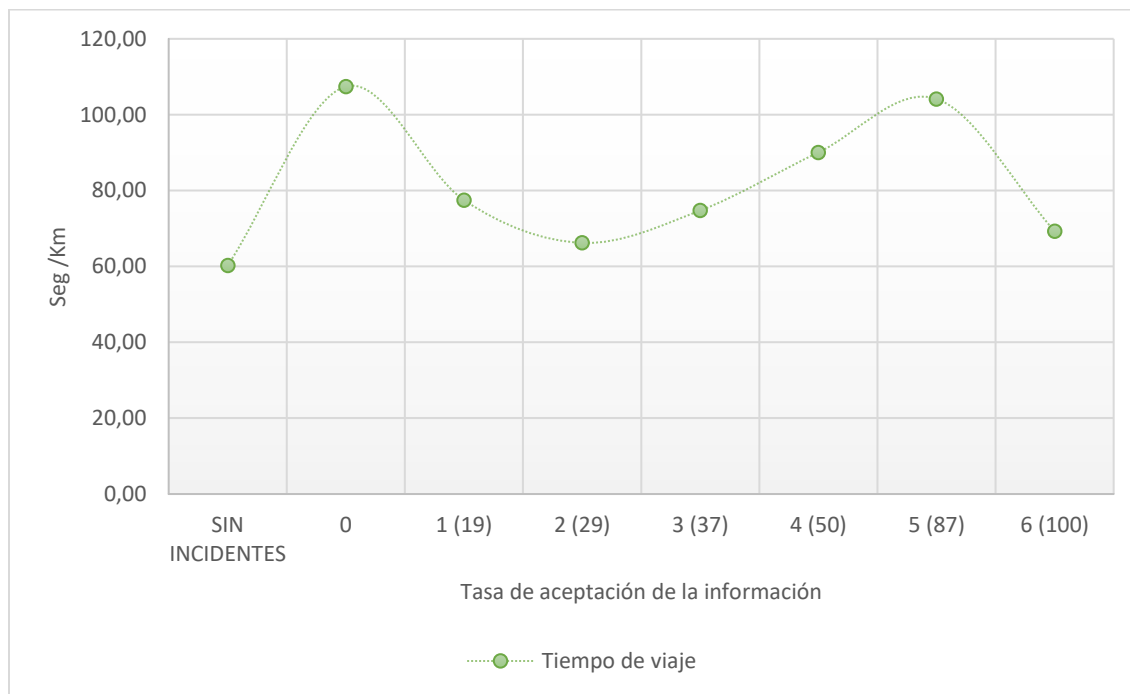
Por último, en la *Figura 64* puede verse el comportamiento del tiempo de viaje, el cual es muy similar a las demás variables estudiadas. Se encuentra que al suministrar información al usuario se evidencia una disminución en los tiempos de viaje de un 39% para el escenario realista No 1, de 62% para el realista 2 y de 44% para el realista 3. Para el escenario medio se evidencia una disminución en los tiempos de viajes de 19%, para el óptimo de 3% y para el escenario de referencia de 55%.

Como se evidenció en los diferentes análisis realizados, fue posible analizar el efecto de un incidente en la red y a su vez analizar el impacto de la información al usuario en la mitigación de los efectos negativos que se generan. Sin embargo, también fue posible identificar que el suministro de información genera mejores resultados en la medida en que se aumenta la información al usuario, sin embargo, esto es correcto para el intervalo de aceptación de entre 0 y 30% a nivel local y de entre 0 y 50% a nivel de red. Así mismo los efectos del suministro de información se aplican para aquellas rutas OD que incluyen el enlace del incidente implementado.

También fue posible observar que el aumento de la tasa de aceptación no involucra mayores beneficios para los escenarios con tasas de aceptación mayor, se encontró que a medida que más usuarios aceptan la información proporcionada migrarán a las rutas alternas sugeridas para evitar el incidente, lo cual afectará a los segmento viales usados para los desvíos asignándoles una mayor demanda de la habitual, lo cual puede afectar sus capacidades, traduciéndose en tiempos de viaje elevados y mayores volúmenes de vehículos asignados a vías con capacidades menores, hallazgos similares se evidenciaron en estudios realizados por autores como Kamga, Mouskos, & Paaswell (2011)

**Figura 64**

*Tiempo de viaje de los escenarios estudiados según el porcentaje de información aceptado por el usuario, zona de influencia carrera 33 con calle 48.*



*Nota. Elaboración propia con base en software AIMSUN*

Finalmente, y como ejemplo del análisis realizado, a continuación, se presenta los resultados asociados al análisis realizado a la velocidad para cada uno de los escenarios. La *Tabla 27* muestra los resultados obtenidos en intervalos de 10 minutos para el periodo de simulación, para cada uno de los escenarios estudiados. En dicha tabla se puede ver la evolución temporal de la variable para cada uno de los escenarios, con el objetivo de dar una visión al lector sobre los resultados obtenidos en la simulación, que para efectos del presente documento se han presentado por medio de gráficas, pero que podrán consultar de forma más detallada en el *Apéndice U*.

**Tabla 27**

*Resultados de velocidades para cada uno de los escenarios de penetración de la información propuestos*

| <b>HORA</b>     | <b>SIN INCIDENTES</b> | <b>0%</b> | <b>19%</b> | <b>29%</b> | <b>37%</b> | <b>50%</b> | <b>87%</b> | <b>100%</b> |
|-----------------|-----------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>17:50:00</b> | 62.94                 | 54.28     | 57.49      | 63.94      | 65.80      | 57.47      | 58.91      | 58.87       |
| <b>18:00:00</b> | 67.39                 | 57.89     | 73.83      | 58.91      | 66.00      | 61.14      | 59.75      | 56.96       |
| <b>18:10:00</b> | 65.72                 | 65.25     | 78.98      | 58.89      | 68.55      | 62.94      | 61.11      | 65.43       |
| <b>18:20:00</b> | 57.86                 | 75.60     | 83.47      | 53.69      | 68.30      | 65.43      | 109.31     | 68.01       |
| <b>18:30:00</b> | 62.80                 | 124.98    | 81.73      | 65.73      | 81.67      | 104.28     | 132.74     | 78.28       |
| <b>18:40:00</b> | 56.13                 | 164.94    | 78.28      | 79.63      | 92.46      | 123.23     | 152.88     | 79.41       |
| <b>18:50:00</b> | 48.99                 | 209.19    | 88.56      | 82.77      | 80.42      | 155.83     | 154.55     | 78.02       |
| <b>19:00:00</b> | 37.11                 | 347.07    | 61.75      | 69.71      | 57.82      | 107.04     | 125.69     | 68.31       |
| <b>Suma</b>     | 421.83                | 752.13    | 542.34     | 463.56     | 523.20     | 630.32     | 729.25     | 484.98      |
| <b>Promedio</b> | 60.26                 | 107.45    | 77.48      | 66.22      | 74.74      | 90.05      | 104.18     | 69.28       |

*Nota. Elaboración propia*

#### **5.4. Conclusiones del impacto del suministro de información al usuario.**

En primera medida se realizó la evaluación de los resultados obtenidos para la implementación de un incidente en la red en estudio, sin considerar los efectos que tiene la información de tráfico en la elección de los conductores. Los análisis fueron realizados para la red global del área metropolitana, mediante subredes que abarcaron cada uno de los municipios que pertenecen a la misma, y de forma adicional se muestran los resultados asociados al rendimiento de la red para la zona de influencia de la implementación de los incidentes

Al evaluar los impactos provocados por la implementación del incidente en la red global, se evidenció que se presenta una disminución en el rendimiento de la red, por ejemplo, al evaluar la velocidad se evidenció una disminución de entre 3 y 5%, el tiempo de viaje promedio de la red tuvo un aumento de 7%, mientras que el tiempo de demora en la red tuvo un aumento de 10%, la cola media de la red global aumento en aproximadamente 15%. Con base en los resultados

obtenidos, se concluyó que es posible que la implementación de incidentes en la red tenga un impacto negativo a nivel de la red global, ya sea en mayor o menor medida, pero mostrando en todos los casos una degradación de las condiciones de movilidad de la red. Esta conclusión resulta lógica para el comportamiento de una red urbana de transporte en condiciones reales.

Al estudiar la red perteneciente a la zona de influencia directa de la aplicación del incidente, podemos evidenciar efectos muchos mayores a los evidenciados en la red global, presentando disminuciones en la velocidad de 38% en promedio, un aumento en los tiempos de demora de 68%, un 66% más de cola media y un aumento en los tiempos de viaje en promedio de 68%. Conforme a lo analizado anteriormente, al implementar un incidente se evidencia un comportamiento de acuerdo con lo esperado, encontrando una disminución en el rendimiento de la red estudiada.

Con base en este primer análisis de referencia, se evaluaron los escenarios de penetración propuesta y de esta forma se determinó si se obtienen o no beneficios al proveer a los usuarios de información de tráfico a partir de tecnologías ATIS. Se propusieron 7 escenarios de suministro de información de tráfico a los usuarios, dos escenarios para evaluar las condiciones críticas, escenarios base (0%) y de referencia (100%) con el objetivo de evaluar escenarios críticos, un escenario medio (50%) y uno optimista (87%) y finalmente 3 escenarios realistas (19%, 29% y 37%). La evaluación se realizó a nivel de red global y para la zona de influencia directa de la implementación del incidente.

Al analizar los efectos del suministro de la información en la red de transporte global, se encontraron evidencias que señalan mejoría en las distribuciones de las diferentes variables estudiadas. Por ejemplo, para la velocidad se evidenció un aumento a medida que se aumenta el suministro de información siendo el pico más alto en el escenario medio con un aumento de 5.5%,

sin embargo, para valores de penetración superiores, se evidencia un decaimiento en las velocidades, no obstante, los escenarios con penetración superior aún evidencian mejoras en las velocidades respecto al escenario base.

Al evaluar el tiempo de demora, la cola media y los tiempos de viaje, se encontró un comportamiento similar evidenciando mejoras a medida que aumenta el grado de penetración hasta llegar a sus máximos en el escenario medio, obteniendo disminuciones en el tiempo de demora de 17%, en la cola media de 16% y en los tiempos de viaje 9%. Así mismo para penetraciones superiores al 50%, se denota una disminución en las bondades evidenciadas por el suministro de información respecto a los escenarios anteriores; pero conservando los beneficios respecto al escenario base.

Las mejorías evidenciadas en las condiciones de la red para los escenarios de penetración hasta el escenario base, pueden derivarse de la redistribución de flujos que se da en la ciudad a causa de la información de tráfico, de forma que se sugiere a los usuarios rutas alternas para sus desplazamientos, mitigando los impactos negativos generados por la implementación del incidente. Sin embargo, esta conclusión no es válida para todos los escenarios estudiados, ya que para escenarios con penetración de información superior al 50%, se encontró al suministrar información un porcentaje muy alto de conductores los beneficios obtenidos pueden disminuir, debido a que la sugerencia de rutas disponibles es tomada a la vez por todos los conductores quienes migran en conjunto a la nueva ruta produciendo un pico de flujo y congestionando la nueva ruta sugerida, o es posible que la ruta sugerida como alternativa para evadir el incidente, no cuente con una capacidad similar a la ruta inicial, lo cual generará un aumento en los tiempos de viaje a medida que la capacidad es superada por el número de usuarios que toman la alternativa sugerida.

Al analizar los resultados en la zona de influencia directa del incidente, se encontró que el comportamiento de la red varía un poco respecto al comportamiento evidenciado en la red global. Al estudiar la velocidad, se encontró que a medida que aumenta la penetración de la información a los usuarios, aumentan las velocidades obtenidas en los escenarios propuestos, sin embargo, este aumento solo se mantiene hasta la aplicación del escenario realista No 3 con un porcentaje de aceptación de la información de 37% obteniendo un máximo de aumento de la velocidad de 10%. Para los escenarios con penetración superior se encontró que la velocidad disminuía respecto al máximo obtenido, especialmente para el escenario optimista donde la disminución de la velocidad llegó a ser incluso menor que en el escenario base.

El tiempo de demora, cola media y tiempo de viaje, tuvieron un comportamiento similar al de la velocidad. Es así como para el tiempo de demora se obtuvo una disminución máxima en el escenario realista No 3 de 44%, para la cola media la disminución fue de 21%. Para el tiempo de viaje la disminución máxima se evidenció en el escenario realista No 2 siendo esta de 62%. Para los escenarios de penetración superiores a 37% las mejoras evidenciadas disminuyen conforme aumenta el grado de penetración.

En todas las variables estudiadas a nivel del área de influencia, se encontró que para el escenario de referencia de 100% de penetración de la información, existe una mejora en todas las variables estudiadas, llegando a valores muy similares al escenario principal sin implementación del incidente. Este comportamiento se atribuye a que al informar al 100% de los conductores sobre el incidente, todos ellos tomarán desvíos sin tomar rutas que puedan atravesar el segmento afectado, por lo cual se eliminan las rutas OD que atravesaban estos segmentos y la demanda se redistribuye en los pares OD restantes, despejando así la zona de influencia afectada y obteniendo de esta forma una mejora significativa de las condiciones de la red.

Como se pudo evidenciar en los diferentes análisis realizados, fue posible analizar el efecto de un incidente en la red y a su vez analizar el impacto que tiene la información al usuario en la mitigación de los efectos negativos que se generan. Sin embargo, también fue posible identificar que el suministro de información genera un mejor rendimiento en la red en la medida en que se aumenta la información al usuario, siendo esto correcto para el intervalo de aceptación de entre 0% y 30% a nivel local y de entre 0% y 50% a nivel de red. También fue posible evidenciar que para valores de penetración superiores a los antes mencionados es posible que se genere una disminución en el rendimiento de la red. Por otro lado, es preciso señalar, que los efectos del suministro de información se aplican para aquellas rutas OD que incluyen el enlace del incidente implementado.

Como se pudo evidenciar a lo largo del documento, existen muchos estudios que han abordado los efectos del suministro de información a los usuarios, con la esperanza de generar reducciones en términos de tiempos de viaje y congestión en las redes estudiadas. Desafortunadamente, en implementaciones ATIS a gran escala en el área de estudio, es imposible evaluar la precisión de los resultados de la investigación. Sin embargo, es razonable evaluar cómo los supuestos del modelo han afectado los resultados. Estudios como el de Hall (1996), (Kamga et al., 2011), (Ben-Akiva et al., 2012) y (Storch et al., 2020), presentan resultados consistentes con los obtenidos en la presente investigación, encontrando reducciones de velocidad en penetración bajas de alrededor de 30% y disminuciones en los beneficios en penetraciones superiores a 50%.

Si bien los resultados obtenidos en la presente investigación sugieren que es posible obtener beneficios del suministro de información de tráfico por medio de ATIS, no es posible probar que sea deseable o no una mayor o menor penetración en el mercado, así como tampoco es posible determinar con seguridad la forma en que los viajeros responderán a la información.

Se espera que sea posible mejorar el modelo desarrollado, mediante la obtención de información de entrada de mayor calidad, considerando la actualización de la matriz OD que se está realizando para el área metropolitana de Bucaramanga, y obteniendo datos de vigilancia de flujo de la red más precisos, con el objetivo de realizar una calibración más exhaustiva del modelo planteado. Sin embargo, los resultados obtenidos a la luz de la escala y la complejidad de la simulación realizada vislumbran un panorama favorable para la implementación de estrategias y políticas basadas en herramientas ATIS.

## **6. Conclusiones generales de la investigación.**

De acuerdo con los resultados obtenidos y la revisión de literatura efectuada, se encontró que existen diferentes tecnologías para proveer información de tráfico a los conductores, y que la consulta de la información, así como su aceptación o rechazo, se deriva del análisis de un conjunto de variables que se asocian a atributos propios del conductor (Ejemplo: edad, habilidad para usar smartphones, etc), y que posteriormente soportan la elección de ruta realizada por el usuario.

Se encontró que el uso de las herramientas o aplicaciones que brindan información de ruta a los usuarios depende de factores como la disponibilidad de la información, la intención a modificar la ruta, la frecuencia de aceptación de la información, la habitualidad de la consulta, la utilidad y la confiabilidad de la información, entre otras. Así mismo se encontró que la proporción de uso de la información puede verse afectada por criterios generacionales o de nivel socioeconómico

Se realizó un análisis detallado a los factores que afectan la elección de ruta de los conductores cuando están expuestos a información de tráfico, a partir de esto se construyeron escenarios probables de aceptación o rechazo de la información de ruta por parte de los conductores, definiendo finalmente siete (7) valores de tasa de aceptación al suministro de información, que se evaluaron posteriormente mediante un modelo de simulación.

Se desarrolló un modelo de simulación que representaba la situación actual de movilidad del área metropolitana de Bucaramanga, el cual contempló una red análoga de transporte, una demanda actualizada, la selección de un método de elección de ruta, y diferentes esfuerzos para lograr la validación y calibración de este. Teniendo como base este modelo, se implementaron

incidentes para entorpecer las condiciones de movilidad habitualidad y se implementaron los escenarios propuestos para su evaluación.

Los resultados obtenidos del proceso de modelación sugieren que cuando existe una eventualidad en la red que entorpece las condiciones de movilidad y de operación habituales, al suministrar información a los conductores puede generarse mejoras en las velocidades, tiempos de viaje, cola media, y en general en el rendimiento general de la red y en su zona de influencia directa.

Se encontró que existen porcentaje óptimos para el suministro de información de ruta a los usuarios, los cuales permiten tener beneficios en términos de reducción de tiempos de viaje, aumentos de velocidades y en general en la disminución de la congestión derivada de incidentes no planeados. Sin embargo, se prevé que para niveles superiores de 50% de suministro de información en redes globales y de 30% en la zona de influencia directa, las mejoras percibidas de los beneficios obtenidos pueden disminuir, por lo cual la implementación de estas medidas debe monitorearse y controlarse por medio de las autoridades locales.

El modelo realizado fue útil para identificar como diferentes grados de suministro de información de tráfico al usuario influyen en la redistribución de los flujos de la red de transporte usada, encontrando que existen ventajas que varían de acuerdo al nivel de aceptación de la información por parte de los conductores. Si bien los resultados obtenidos son prometedores, es necesario continuar indagando sobre los beneficios atribuidos a la implementación de ATIS en el contexto local.

## 7. Consideraciones finales

De acuerdo con el planteamiento realizado para el primer objetivo, la presente investigación realizó la caracterización y análisis de las tecnologías de información usadas para el suministro de información de tráfico, a la vez que se identificaron y se definieron las variables que influyen en la elección de ruta de los conductores, a partir de lo cual fue posible definir las tasas de aceptación de la información de tráfico en el contexto del área metropolitana de Bucaramanga.

Posteriormente se realizó un modelo de mesosimulación dinámico el cual fue calibrado y validado, con el objetivo de generar un escenario de movilidad típica, a partir del cual se modelaron los efectos de la penetración de la información en la red de transporte del área metropolitana de Bucaramanga, de acuerdo con el planteamiento establecido para el segundo objetivo propuesto.

Por último, se determinó la variabilidad en la respuesta de los escenarios de penetración de la información, identificando los impactos generados en el rendimiento de la red, debido a la redistribución de flujos generada por los escenarios de suministro de información de tráfico, dando cumplimiento al tercer objetivo planteado.

En conjunto las actividades realizadas permitieron dar cumplimiento al objetivo general de la presente investigación, de manera que se identificó como diferentes grados de penetración de información suministrada al viajero, impactan en la redistribución de flujos de una red de transporte, tomando como caso de estudio el área metropolitana de Bucaramanga. Las conclusiones respectivas del proceso realizado se presentaron a medida que se superaba cada etapa del proceso y al finalizar el documento de forma global, a partir de ellas se generaron algunas recomendaciones a tener en cuenta para estudios futuros.

## 8. Recomendaciones

Las herramientas DTA son usadas para mejorar los planes de gestión del tráfico y para la evaluación de estrategias orientadas al desvío de rutas y al seguimiento de diferentes incidentes que puedan presentarse en la red. Se recomienda implementar esta herramienta en el centro de gestión de tráfico de la ciudad, junto con el seguimiento a servicios ATIS que permitirán conocer la situación del tráfico en tiempo real en la ciudad, con el objetivo de tomar decisiones rápidas para sortear posibles inconvenientes presentados.

Conviene aclarar que para la ejecución del modelo de simulación propuesto se han estimado con base en aproximaciones de otros estudios, valores requeridos para la simulación como los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  necesarios para la estimación de la función BPR, y los valores de seleccionados de elasticidad para el ajuste de la matriz. Se recomienda orientar estudios específicos a la estimación de estos parámetros para el área metropolitana de Bucaramanga, ya que esto permitirá lograr un mejor ajuste de los modelos de simulación implementados para la ciudad. Por lo tanto, se recomienda efectuar una investigación enfocada a la determinación de los parámetros para el contexto no solo de la ciudad si no de cada uno de sus tipos de vías característicos de acuerdo con las capacidades y flujos existentes.

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad realizado a los diferentes escenarios de suministro de información al viajero, se recomienda no ver la implementación de las ATIS como estrategias para lograr distribuciones óptimas, sino como un servicio que puede informar a los usuarios, brindando confianza y comodidad a los conductores, y como forma de desviar el tráfico en caso de se presenten que eventos fortuitos que puedan degradar el rendimiento de la red.

También se identificó que el éxito para reproducir las condiciones de movilidad del área de estudio se basa en la información disponible para su actualización y calibración, por lo tanto, se recomienda aplicar métodos que permitan mantener actualizada la información de viajes, volúmenes y velocidades, entre otras, variables requeridas para el seguimiento del tráfico en las ciudades. Esto se puede lograr mediante la implementación de datos de vehículos flotantes generados desde dispositivos GPS instalados en vehículo de transporte público como taxis, con el objetivo de recopilar datos de velocidad. Otra opción es la generación de aplicaciones para dispositivos móviles que permita conocer información sobre los viajes de los usuarios, o como se ha realizado en otras ciudades, generar asociaciones con plataformas o centros de información que brindan información al viajero, de forma que sea posible compartir y generar información en conjunto, orientadas al seguimiento de la situación de movilidad de la ciudad para lograr la implementación de soluciones en tiempo real. La implementación de este tipo de soluciones puede ser la base para soluciones innovadoras de bajo costo que podrían generar un impacto significativo en la movilidad de la ciudad.

Considerando que no fue posible obtener una distribución probabilística para la aplicación de la encuesta realizada en la presente investigación, los resultados obtenidos no se entenderán como una representación de la población total. Con el propósito de mejorar este ejercicio y entendiendo que los esfuerzos requeridos para la ejecución de un muestro probabilístico sobrepasan en gran medida los alcances de la presente investigación, se recomienda incluir los criterios aquí expuestos en los próximos esfuerzos de encuestas OD que se realicen en el área metropolitana de Bucaramanga o que se aproveche los operativos de censos realizados, ya que estos operativos de levantamiento de información cuentan con un proceso estadístico muy riguroso lo que permitiría obtener resultados que representen las preferencias de la población de interés.

### Referencias Bibliográficas

- Ackaah, W. (2019). Exploring the use of advanced traffic information system to manage traffic congestion in developing countries. *Scientific African*, 4, e00079. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00079>
- Abreo, J. (2018). Pasantía de investigación en el grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas, para ajustar el modelo de asignación de tráfico utilizado en la priorización de proyectos de infraestructura vial en la ciudad de Bucaramanga. Bucaramanga, Santander, Colombia.
- Acevedo, H. (mayo de 2011). El proceso de codificación en investigación cualitativa. Obtenido de [www.eumed.net/rev/cccss/12/](http://www.eumed.net/rev/cccss/12/).
- Aimsun 20.1. (2017). Aimsun 8.2 User's Manual. Manual del Usuario de Software. Barcelona.
- Ackaah, W. (2019). Exploring the use of advanced traffic information system to manage traffic congestion in developing countries. *Scientific African*, 4, e00079. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00079>
- Agosta, R., Martinez, J. P., Roca, M., & Albrieu, J. (n.d.). Elasticidad de la demanda de transporte público de pasajeros el caso del metro de buenos aires.
- Area Metropolitana de Bucaramanga & Universidad Industrial de Santander. (2018). Áunar esfuerzos entre el Área Metropolitana de Bucaramanga y la Universidad Industrial de Santander para la consolidación del Sistema de información geográfica del AMB. Bucaramanga, Santander, Colombia.

- Área Metropolitana de Bucaramanga. (s.f.). Observatorio Metropolitano Área Metropolitana de Bucaramanga. Obtenido de <http://www.observatoriometropolitano.com.co:8080/Indicador/Index/7>
- Antoniou, C., Balakrishna, R., Koutsopoulos, H. N., & Ben-Akiva, M. (2011). Calibration methods for simulation-based Dynamic Traffic Assignment systems. *International Journal of Modelling and Simulation*, 31(3), 227–233. <https://doi.org/10.2316/Journal.205.2011.3.205-5510>
- Banco Interamericano de Desarrollo BID. (2020). Análisis del estado del arte y experiencias de gestión de demanda de transporte urbano en América Latina y el Caribe. <http://www.iadb.org>
- Bagloee, S. A., Ceder, A., & Bozic, C. (2012). Effectiveness of en route traffic information in developing countries using conventional discrete choice and neural-network models. *Journal of Advanced Transportation*, 47(June 2010), 512–525. <https://doi.org/10.1002/atr>
- Barceló, J, Montero, L., Marqués, L., & Carmona, C. (2010). A Kalman-Filter Approach For Dynamic OD Estimation In Corridors Based On Bluetooth And Wifi Data Collection. *Proceedings 12th World Conference on Transportation Science*, Lisboa 11-15 July 2010, 11–15.
- Barceló, Jaime, & Casas, J. (2006). Based on AIMSUN Microscopic Traffic Simulator. (1964), 70–80.
- Bazzan , L., & Klugl, F. (May de 2013). A review on agent-based technology for traffic and transportation. *The Knowledge Engineering Review*, Vol. 29:3, pp. 375–403.
- Ben-Akiva, M., Gao, S., Wei, Z., & Wen, Y. (2012). A dynamic traffic assignment model for highly congested urban networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24, 62–82. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.02.006>

- Ben-Akiva, M., Koutsopoulos, H. N. H. N., & Mukundan, A. (1994). a Dynamic Traffic Model System for Atms/Atis Operations. *I V H S Journal*, 2(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/10248079408903812>
- Ben-Elia, E., & Avineri, E. (2015). Response to Travel Information: A Behavioural Review. *Transport Reviews*, 35(3), 352–377. <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1015471>
- Ben-Elia, E., Di Pace, R., Bifulco, G. N., & Shiftan, Y. (2013). The impact of travel information's accuracy on route-choice. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 26, 146–159. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.07.001>
- Benitez, F. G., Romero, L., Caceres, N., & Del Castillo, J. M. (2013). Adjustment of origin–destination matrices based on traffic counts and bootstrapping confidence intervals. *Transportation Research Record*, 2343(2343), 43–50. <https://doi.org/10.3141/2343-06>
- Blainey, S. P., & Preston, J. M. (2019). Predict or prophesy? Issues and trade-offs in modelling long-term transport infrastructure demand and capacity. *Transport Policy*, 74(June 2018), 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.12.001>
- Bonsall, P. (1992). Acceptance of route guidance advice: an international comparison.
- Bonsall, P. (1992). The influence of route guidance advice on route choice in urban networks. *Transportation*.
- Bonsall, P., & Palmer, I. (1998). VMS signs—the importance of phrasing the message.
- Castillo, M., Martinez, Y., & Porras, H. (n.d.). Modelo de asignación de tráfico y su uso en la priorización de proyectos viales del área metropolitana de Bucaramanga. 1–12.
- Campbell, J. L., Carney, C., & Kantowitz, B. H. (2003). Human factors design guidelines for Advanced Traveler Information Systems (ATIS) and Commercial Vehicle Operation (CVO). Federal Highway Admin.

- Cascetta, E. (1984). Estimation of Trip Matrices from Traffic Counts and Survey. *Transportation Research Part B*, Vol. 18, 288–299.
- Cascetta, E. (2001). *Transportation Systems Engineering: Theory and Methods*. Kluwer Academic Publishers.
- Chen, A., Pravinvongvuth, S., Xu, X., & Ryu, S. (2012). Examining the scaling effect and overlapping problem in logit-based stochastic user equilibrium models. *Transportation Research Part A*, 46(8), 1343–1358. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.04.003>
- Chorus, C. G., Molin, E. J. E., & Van Wee, B. (2007). Use and effects of Advanced Traveller Information Services (ATIS): A review of the literature. *Transport Reviews*, 26(2), 127–149. <https://doi.org/10.1080/01441640500333677>
- Cipriani, E., Nigro, M., Fusco, G., & Colombaroni, C. (2014). Effectiveness of link and path information on simultaneous adjustment of dynamic O-D demand matrix. *European Transport Research Review*, 6(2), 139–148. <https://doi.org/10.1007/s12544-013-0115-z>
- Codina, E., & Barceló, J. (2004). Adjustment of O-D trip matrices from observed volumes: An algorithmic approach based on conjugate directions. *European Journal of Operational Research*, 155(3), 535–557. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.08.004>
- Cuellar, O. (2016). Actualización y Calibración del Modelo de Asignación de Tráfico de Hora Pico para Vehículo Particular y Estudio del Modelo a través del Análisis de Resultados y Sensibilidad. Aplicación al Caso de Bogotá. 177.
- De Rus, G., Campos, J., & Nombela, G. (2003). *Economía del transporte*. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2020). DANE. Obtenido de [www.dane.gov.co/](http://www.dane.gov.co/)

- Escobar, L. M., Parra, K., Marín, C. A., Bolaños, I. R., & Martínez, D. A. (2020). Elasticidad de la demanda en el subsistema de transporte masico del Área Metropolitana Centro Occidente en función del invremento de la tarifa.
- Federal Highway Administration. (2014). TMIP Email List Technical Synthesis Series 2007-2010. Washington D.C.: Office of Planning Environment , & Realty. Recuperado el 2020, de [https://www.fhwa.dot.gov/planning/tmip/publications/other\\_reports/technical\\_synthesis\\_report/page13.cfm](https://www.fhwa.dot.gov/planning/tmip/publications/other_reports/technical_synthesis_report/page13.cfm)
- Fehr & Peers. (2010). Mendocino county travel demand model. (October).
- Florian, M., Mahut, M., & Tremblay, N. (2001). A hybrid optimization-mesoscopic simulation dynamic traffic assignment model. IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 118–121.
- García-Ródenas, R., & Verastegui-Rayo, D. (2013). Adjustment of the link travel-time functions in traffic equilibrium assignment models. *Transportmetrica A: Transport Science*, 9(9), 798–824. <https://doi.org/10.1080/18128602.2012.669415>
- Hall, R. W. (1996). Route choice and advanced traveler information systems on a capacitated and dynamic network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 4(5), 289–306. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(97\)82902-6](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(97)82902-6)
- Instituto Nacional de Vías. (2008). Manual de Diseno Geometrico de Carreteras. *Ciencia*, 84, 1–6. Retrieved from <http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/POT/inza/02-SubsistemaPolitico.pdf><https://www.iadb.org/es/acerca-del-bid/politica-de-desarrollo-rural%2C6229.html>[https://elpais.com/elpais/2016/08/26/ciencia/1472225923\\_727879.html](https://elpais.com/elpais/2016/08/26/ciencia/1472225923_727879.html)<https://www.redalyc>.

- Instituto Nacional de Vías. (2020). Manual de Capacidad y Niveles de Servicio para vías multicarril. Retrieved from <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/5756/acerca-de-its/>
- Iooss, B., & Saltelli, A. (2015). Handbook of Uncertainty Quantification. Handbook of Uncertainty Quantification, 1–20. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11259-6>
- Islas, V. M., Rivera, C., & Torres, G. (2002). Estudio de la Demanda de Transporte. Publicación Técnica, (213), 146. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=937993>
- Jiménez, E. (28 de 03 de 2021). doblevia.wordpress.com. Obtenido de Controles para el diseño geométrico. Universidad de Ibagué: <https://doblevia.files.wordpress.com/2007/02/2545-cap2.pdf>
- Kamga, C. N., Mouskos, K. C., & Paaswell, R. E. (2011). A methodology to estimate travel time using dynamic traffic assignment (DTA) under incident conditions. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 19(6), 1215–1224. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.02.004>
- Khattak, A. J., Pan, X., Williams, B., Roupail, N., & Fan, Y. (2008). Traveler information delivery mechanisms: Impact on consumer behavior. Transportation Research Record, (2069), 77–84. <https://doi.org/10.3141/2069-10>
- Kinnear, T., & Taylor, J. (2007). Investigación de mercados: un enfoque aplicado. Terceira Edição, 67(6), 14–21. Retrieved from <https://books.google.com.pe/books?id=SLmEblVK2OQC&pg=PA301&dq=prueba+piloto&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjR3IGIwO3kAhVPuVkkKHT3yAccQ6AEIKDAA#v=onepage&q=prueba+piloto&f=false>

- Kostic, B., Meschini, L., & Gentile, G. (2017). Calibration of the demand structure for dynamic traffic assignment using flow and speed data: Exploiting the advantage of distributed computing in derivative-free optimization algorithms. *Transportation Research Procedia*, 27, 993–1000. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.041>
- Kumar, P., Singh, V., & Reddy, D. (2003). GIS based advanced traveler information system for Hyderabad city. *Intelligent Transportation Systems, 2003. Proceedings. 2003 IEEE*, 1(1), 497–505 vol.1. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2003.1252003>
- Li, S. Bin, Li, Y., Fu, B. B., & Dang, W. X. (2016). Study on Simulation Optimization of Dynamic Traffic Signal Based on Complex Networks. *Procedia Engineering*, 137, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.228>
- Lizarbe, H. (2015). CALIBRACIÓN DE LAS FUNCIONES VOLUMEN DEMORA: CASO REDES VIALES PRINCIPALES DE LA CIUDAD DE AYACUCHO. 1–167.
- Mahmassani, H. (2001). Dynamic Network Traffic Assignment and Simulation Methodology for Advanced System Management Applications. *Networks and Spatial Economics*, 1(3–4), 267–292. <https://doi.org/10.1023/A:1012831808926>
- Mahut, M., Florian, M., & Tremblay, N. (2002). Traffic Assignment Model. (September), 439–444.
- Márquez, G., & Cantillo, V. (2011). Evaluación de los parámetros de las funciones de costo en la red estratégica de transporte de carga para Colombia. 29(2), 1–10.
- Márquez, L., García, D., & Guarín, L. (2014). Funciones volumen-Demora BPR y cónica en vías multicarriles de Bogotá. 30–39.

- Minitab 18. (2021). Soporte de Minitab 18. Obtenido de Prueba de chi-cuadrado para asociación.:  
<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/tables/how-to/chi-square-test-for-association/before-you-start/overview/>
- Moreno, E., Rico, O., & Bustos, A. (2014). Funciones volumen-demora en la modelación de flujos vehiculares. Instituto Mexicano Del Transporte, (427), 67.
- Noriega, Y., & Florian, M. (2009). Some enhancements of the Gradient method for OD Matrix adjustment. (February). Retrieved from [http://www.trbappcon.org/2009conf/TRB2009papers/0203\\_Mike\\_Florian\\_O\\_D\\_Matrix\\_CIRRELT\\_2009\\_04.pdf](http://www.trbappcon.org/2009conf/TRB2009papers/0203_Mike_Florian_O_D_Matrix_CIRRELT_2009_04.pdf)
- Ortúzar, J. d. (2015). Modelos de demanda de Transporte. Bogotá: Ediciones Universidad Católica de Chile.
- Ortuzar, J. D., & Willumsen, L. (2011). Modelling Transport. 4th edition. Chichester. UK: John Wiley.
- Peeta, S., & Ziliaskopoulos, A. K. (2001). Foundations of Dynamic Traffic Assignment : The Past , the Present and the Future. Networks and Spatial Economics, 1(3), 233–265.  
<https://doi.org/10.1023/A:1012827724856>
- Peña, D. (2002). Analisis de Datos Multivariantes, 2002. (December), 201–226. Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Daniel\\_Pena4/publication/40944325\\_Analisis\\_de\\_Datos\\_Multivariantes/links/549154880cf214269f27ffae/Analisis-de-Datos-Multivariantes.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Daniel_Pena4/publication/40944325_Analisis_de_Datos_Multivariantes/links/549154880cf214269f27ffae/Analisis-de-Datos-Multivariantes.pdf?origin=publication_detail)
- Prashker, J. N., & Bekhor, S. (2004). Transport Reviews : A Transnational Route Choice Models Used in the Stochastic User Equilibrium Problem : A Review Route Choice Models Used

- in the Stochastic User. (March 2013), 37–41.  
<https://doi.org/10.1080/0144164042000181707>
- Prato, C. G. (2009). Route choice modeling : past , present and future research directions. *Journal of Choice Modeling*, 2(1), 65–100. [https://doi.org/10.1016/S1755-5345\(13\)70005-8](https://doi.org/10.1016/S1755-5345(13)70005-8)
- Schuschny, A., & Soto, H. (2009). Guía metodológica Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible Andrés Schuschny. Cepal, 109. <https://doi.org/LC/W255>
- Shafiei, M., Nazemi, M., & Seyedabrishami, S. (2015). Estimating time-dependent origin-destination demand from traffic counts: Extended gradient method. *Transportation Letters*, 7(4), 210–218. <https://doi.org/10.1179/1942787514Y.0000000048>
- Srinivasan, K. K., & Mahmassani, H. S. (2003). Analyzing heterogeneity and unobserved structural effects in route-switching behavior under ATIS: a dynamic kernel logit formulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 37(9), 793–814. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(02\)00063-2](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(02)00063-2)
- Storch, D. M., Schröder, M., & Timme, M. (2020). Traffic flow splitting from crowdsourced digital route choice support. *Journal of Physics: Complexity*, 1(3). <https://doi.org/10.1088/2632-072X/aba83e>
- Sundaram, S., Koutsopoulos, H. N., Ben-Akiva, M., Antoniou, C., & Balakrishna, R. (2011). Simulation-based dynamic traffic assignment for short-term planning applications. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(1), 450–462. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2010.08.004>
- Velasquez, M. (2011). ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD A UN MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS: GOLFO DE URABÁ, COLOMBIA. 1–13.
- Vuchic, V. R. (2005). *Urban transit. Operations, Planning and Economics.*

- Wardman, M., Bonsall, P. W., & Shires, J. D. (1997). Driver response to variable message signs: A stated preference investigation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 5(6), 389–405. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(98\)00004-7](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(98)00004-7)
- Zhang, A., & Gao, Z. (2012). Effect of ATIS Information under Incident-based Congestion Propagation. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 43, 628–637. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.04.136>
- Zhang, L., & Levinson, D. (2008). Determinants of route choice and value of traveler information: A field experiment. *Transportation Research Record*, (2086), 81–92. <https://doi.org/10.3141/2086-10>
- Zhou, Z., Chen, A., & Bekhor, S. (2014). Transportmetrica C-logit stochastic user equilibrium model: formulations and solution algorithm. (December 2014), 37–41. <https://doi.org/10.1080/18128600903489629>

## **Apéndices**

**Apéndice A.** Caracterización variables

**Apéndice B.** Metadatos Variables

**Apéndice C.** Formato Encuesta

**Apéndice D.** Consideraciones Éticas

**Apéndice E.** Folleto Informativo

**Apéndice F.** Respuesta Encuesta Sin Procesar

**Apéndice G.** Base Datos Definitiva

**Apéndice H.** Análisis Chi Cuadrado

**Apéndice I.** Análisis General Encuesta

**Apéndice J.** Análisis Asociación

**Apéndice K.** Información SHP Base

**Apéndice L.** Información SHP Actualizada

**Apéndice M.** Mapas

**Apéndice N.** Conteos

**Apéndice O.** Información Malla AMB Principal

**Apéndice P.** Semaforización

**Apéndice Q.** Matrices

**Apéndice R.** Modelo de Simulación

**Apéndice S.** Resultados Actualización Matriz

**Apéndice T.** Resultados Modelo Principal

**Apéndice U.** Resultados Modelo informacion

**Apéndice V. Velocidad**

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS