



Propuesta metodológica para el cálculo de las penalidades por giro en modelos de accesibilidad

Santiago Cardona Urrea

Tesis de investigación presentada como requisito para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Infraestructura y Sistemas de Transportes

Director:

PhD Diego Alexander Escobar García

Línea de Investigación:

Accesibilidad Territorial

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil

Manizales, Colombia

2018

Para mi familia porque son mi soporte y motivación.

Para María Alejandra,

“Existimos mientras alguien nos recuerda”

Carlos Ruiz Zafón.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a Dios por siempre permanecer junto a mí en los momentos difíciles. Asimismo, a mi familia debido a que son la base de mi formación personal y me apoyan de manera incondicional. Mis padres María Edilma Urrea y Jaime Cardona, mi abuela Nohemí Giraldo y mi hermana Valentina Cardona, para ellos más que para nadie es este logro.

Por otro lado, agradezco a mi amigo y tutor Diego Alexander Escobar García, su contribución a este trabajo, que va más allá de su labor como profesional y educador ha sido fundamental para mi formación personal y académica. Además, agradezco a mis amigos y compañeros los Ingenieros Jorge Alberto Montoya, Diego Fernando García, Alejandro Londoño y Juan Camilo Aguilera por su contribución.

Además, quiero agradecer a la Vicerrectoría de Investigaciones y a la Dirección de investigación y Extensión de la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo dado al proyecto con código 41064 denominado “Propuesta metodológica para el cálculo de las penalidades por giro en modelos de accesibilidad” a través de la convocatoria “CONVOCATORIA NACIONAL PARA EL APOYO AL DESARROLLO DE TESIS DE POSGRADO O DE TRABAJOS FINALES DE ESPECIALIDADES EN EL ÁREA DE LA SALUD, DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA 2017-2018”. Asimismo, al Centro de Producción Audiovisual de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales (CEPAUN), especialmente a su coordinador Jaime Buitrago Alba y asistente Natalia Osorio Grajales, por su disposición al momento del préstamo de equipos audiovisuales, indispensables para la toma de videos en campo de las intersecciones viales.

Por último, quisiera agradecer a todas las personas que han sido parte de mi formación académica y personal, desde los profesores del colegio y la Universidad hasta mis amigos

más cercanos Laura Londoño, Andrés Felipe Osorio, Juan David Serna, Santiago Zuluaga,
Alejandro Díaz y Juan Camilo Espinoza.

Resumen

En esta tesis de maestría se busca desarrollar una metodología para el cálculo de las penalidades por giro a utilizar en los modelos de accesibilidad y en general en los modelos de transportes dada la utilización de algoritmos de caminos mínimos en el cálculo de los tiempos de viaje en la red vial que incluyen penalizaciones y restricciones por giro, entre estos la accesibilidad media global, utilizada en diversos temas como la planificación urbana y de transportes en Manizales (Colombia) y diferentes ciudades alrededor del mundo. En esta ciudad se han utilizado penalidades y restricciones por giro determinadas de manera subjetiva por lo que no se tiene un valor calculado a partir de un método científico. Por lo tanto, se calcularán las penalidades y restricciones por giro para la ciudad de Manizales realizando una cuantificación de los tiempos de giro de los vehículos en diversas intersecciones viales, escogidas a partir de un análisis de priorización y registrando un video en cada una. Con estos datos se podrá obtener el promedio de giro a izquierda y derecha, es decir, las penalidades por giro para Manizales a utilizar en los modelos de accesibilidad calculados en la ciudad o en general para los modelos de transportes. Las penalidades calculadas mediante esta metodología serán comparadas con las penalidades utilizadas en investigaciones previas a través del gradiente de ahorro, el cual nos permite cuantificar las diferencias generadas por este dato y su importancia en los modelos de transportes, entre ellos la accesibilidad.

Palabras clave: Penalidades por giro, modelos de transporte, accesibilidad, gradiente de ahorro, metodología.

Methodological proposal for the calculation of turn penalties in accessibility models

Abstract

In this Master's degree thesis seeks develop a methodology for the calculation of turn penalties to use in accessibility models and in general for transport models given in the recent use of algorithms of shortest paths for the calculation of travel times in the road network that includes turn penalties and restrictions, among then the global mean accessibility, used in some issues such as urban and transport planning in Manizales (Colombia) and different cities around the world. At Manizales, turn penalties and restrictions used in accessibility models are determined by a subjective way, so there are not calculated from a scientific method. Therefore, turn and restrictions penalties for Manizales will be calculated, making a quantification of the turn times of the vehicles in different road intersections, chosen from a prioritization analysis and recording a video in each one. With this data we can obtain the average time to turn to left and right, that is, the turn penalties for Manizales to be used in the accessibility models calculated in the city or in general in the transport models. The penalties calculated using this methodology will be compared with the penalties used in previous investigations through the saving gradient, which allows us to quantify the differences generated by this data and its importance in transport models, including accessibility.

Keywords: Turn penalties, transport models, accessibility, saving gradient, methodology.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras	XII
Lista de gráficas	XIV
Lista de tablas	XVI
1. Introducción	19
1.1 Penalidades y Restricciones por Giro y su relación en los Modelos de Transportes.....	19
1.2 Manizales, Zona de Estudio.....	21
2. Marco Teórico	25
2.1 Estado del arte	25
2.2 Marco Conceptual.....	27
2.2.1 Intersecciones Viales	27
2.2.2 Intersecciones Viales a Nivel.....	28
2.2.3 Canalización de Tráfico.....	28
2.2.4 Tipo de Regulación de Tráfico.....	28
2.2.5 Número de Ramales	30
2.2.6 Nomenclatura de Movimientos en Intersecciones Viales.....	30
2.2.7 Puntos de Conflicto	30
2.2.8 Sistema de Movilidad Urbano.....	33
2.2.9 Vía Arteria Principal	33
2.2.10 Vía Arteria Secundaria	33
2.2.11 Vía Colectora	33
2.2.12 Vía Local.....	33
2.2.13 Métodos Estadísticos en Ingeniería de Tránsito	34
2.2.14 ¿Qué es un modelo?.....	35
2.2.15 Los Modelos del transporte	35
2.2.16 Modelos de Demanda	36
2.2.17 Modelos de Oferta.....	38
2.2.18 Accesibilidad	38
2.2.19 Accesibilidad Media Global	41
2.2.20 Red Vial	41
2.2.21 Algoritmo de Dijkstra	42
2.2.22 Matriz de Tiempos de Viaje y Vector de Tiempos Promedio de Viaje ..	43
2.2.23 Gradiente de Ahorro.....	43

2.2.24	Modelo Geo estadístico	43
3.	Metodología.....	45
3.1	Análisis de priorización de Intersecciones Viales.....	45
3.1.1	Definición de variables de priorización:.....	46
3.1.2	Calificación de Intersecciones Viales	48
3.1.3	Priorización de Intersecciones Viales.....	48
3.2	Toma y análisis de datos.....	48
3.2.1	Toma de datos en campo	49
3.2.2	Análisis de datos tomados en campo.....	50
3.2.3	Análisis Estadístico de Tiempos de Giro	51
3.2.4	Cálculo de Penalidades por Giro	52
3.3	Cálculo de Accesibilidad Media Global y Gradiente de Ahorro	53
3.3.1	Puesta a punto de la red vial y el polígono de barrios	53
3.3.2	Cálculo de Accesibilidad Media Global	54
3.3.3	Cálculo del Gradiente de Ahorro	57
3.3.4	Modelo Geo Estadístico, Construcción de Curvas Isócronas y relación con el Polígono de Barrios	57
4.	Resultados	59
4.1	Análisis de priorización y datos recolectados, intersecciones viales	59
4.1.1	Intersección Vial 1	60
4.1.2	Intersección Vial 2	64
4.1.3	Intersección Vial 3	68
4.1.4	Intersección Vial 4	70
4.1.5	Intersección Vial 5	74
4.1.6	Intersección Vial 6	78
4.1.7	Intersección Vial 7	82
4.1.8	Intersección Vial 8	86
4.1.9	Intersección Vial 9	89
4.1.10	Intersección Vial 10	92
4.1.11	Intersección Vial 11	95
4.1.12	Intersección Vial 12	99
4.1.13	Intersección Vial 13	102
4.1.14	Intersección Vial 14	106
4.1.15	Intersección Vial 15	109
4.1.16	Intersección Vial 16	112
4.1.17	Intersección Vial 17	115
4.1.18	Intersección Vial 18	119
4.1.19	Intersección Vial 19	122
4.1.20	Intersección Vial 20	126
4.1.21	Resumen de resultados de cada intersección vial	130
4.2	Cálculo de penalidades por giro	132
4.2.1	Análisis general de giro a la izquierda.....	132
4.2.2	Análisis general de giro a la derecha	134
4.2.3	Análisis intersecciones semaforizadas, giro a la izquierda.....	136
4.2.4	Análisis intersecciones semaforizadas, giro a la derecha	138
4.2.5	Análisis intersecciones reguladas mediante PARE o Ceda el Paso, giro a la izquierda	140

4.2.6	Análisis intersecciones reguladas mediante PARE o Ceda el Paso, giro a la derecha	142
4.2.7	Resumen y resultados penalidades por giro.....	144
4.3	Accesibilidad Media Global y Gradiente de Ahorro	145
4.3.1	Accesibilidad Media Global para Manizales calculadas con penalidades por giro subjetivas	145
4.3.2	Accesibilidad Media Global para Manizales calculadas con penalidades por giro obtenidas mediante la metodología propuesta	148
4.3.3	Gradiente de Ahorro.....	151
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	155
5.1	Análisis de priorización	155
5.2	Toma y Análisis de Videos.....	156
5.3	Análisis de tiempos y Cálculo de penalidades	156
5.4	Accesibilidad Media Global y Gradiente de Ahorro	157
5.5	Futuras líneas de investigación.....	158
6.	Referencias.....	159

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Giro a izquierda y derecha en una intersección vial.....	20
Figura 2 Localización geográfica de la zona de estudio.	21
Figura 3 Viajes promedio por persona según estrato socio economico.	22
Figura 4 Perfil a lo largo del día de los viajes.	23
Figura 5 Partición modal de los viajes.	24
Figura 6 Intersección vial a nivel (izquierda) e Intercambiador vial (derecha), en Manizales, Caldas.....	27
Figura 7 Intersecciones viales reguladas por señal de PARE (a) y CEDA el PASO (b)..	29
Figura 8 Intersección vial regulada por semáforo.	29
Figura 9 Nomenclatura de movimientos RILSA.	30
Figura 10 Conflictos en intersecciones viales a nivel.....	31
Figura 11 Conjunto de conflictos en una intersección de cuatro ramales.	32
Figura 12 Nomenclatura de conflictos en una intersección vial.	32
Figura 13 Metodología general de investigación.	45
Figura 14 Fase 1. Análisis de priorización de intersecciones viales.....	46
Figura 15 Mapa U-13 “Subsistema vial- Red Arterial Urbana”.	47
Figura 16 Fase 2. Toma de datos en campo, análisis de datos y cálculos de penalidades por giro.....	49
Figura 17 Toma de videos en intersecciones viales.	50
Figura 18 Instante de inicio (a) y fin (b) de toma de tiempo en intersección vial, cuando no existe cola de espera.	51
Figura 19 Instante de inicio (a) y fin (b) de toma de tiempo en intersección vial, cuando existe cola de espera	51
Figura 20 Fase 3. Cálculo de accesibilidad media global y gradiente de ahorro.....	53
Figura 21 Calcular geometría en ArcGis.....	54
Figura 22 Creación de la red de transportes en TRANSCAD.	55
Figura 23 Ingreso de las penalidades por giro globales en TRANSCAD.	56
Figura 24 Cálculo de la matriz de tiempos de viaje en TRANSCAD.	56
Figura 25 Modelo geo estadístico en ArcGis.	57
Figura 26 Intersección de polígonos en ArcGis.	58
Figura 27 Georreferenciación de intersecciones viales resultadas del análisis de priorización.	60
Figura 28 Intersección vial 1 (a). Conflictos intersección vial 1 (b).....	61
Figura 29 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 1.....	62
Figura 30 Intersección vial 2 (a). Conflictos intersección vial 2 (b).....	65

Figura 31 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 2.	66
Figura 32 intersección vial 3 (a). Conflictos intersección vial 3 (b).	68
Figura 33 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 3.	69
Figura 34 Intersección vial 4 (a). Conflictos intersección vial 4 (b).	71
Figura 35 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 4.	72
Figura 36 Intersección vial 5 (a). Conflictos intersección vial 5 (b).	75
Figura 37 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 5.	76
Figura 38 Intersección vial 6 (a). Conflictos intersección vial 6 (b).	79
Figura 39 Toma de video (a) y nombre de movimientos (b), intersección vial 6.	80
Figura 40 Intersección vial 7 (a). Conflictos intersección vial 7 (b).	83
Figura 41 Toma de video (a) y nombre de movimientos (b), intersección vial 7.	84
Figura 42 Intersección vial 8 (a). Conflictos intersección vial 8 (b).	87
Figura 43 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 8.	88
Figura 44 Intersección vial 9 (a). Conflictos intersección vial 9 (b).	89
Figura 45 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 9.	90
Figura 46 Intersección vial 10 (a). Conflictos intersección vial 10 (b).	92
Figura 47 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 10.	93
Figura 48 Intersección vial 11 (a). Conflictos intersección vial 11 (b).	96
Figura 49 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 11.	97
Figura 50 Intersección vial 12 (a). Conflictos intersección vial 12 (b).	100
Figura 51 Nombre de movimientos intersección vial 12.	101
Figura 52 Intersección vial 13 (a). Conflictos intersección vial 13 (b).	103
Figura 53 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 13.	104
Figura 54 Intersección vial 14 (a). Conflictos intersección vial 14 (b).	107
Figura 55 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 14.	108
Figura 56 Intersección vial 15 (a). Conflictos intersección vial 15 (b).	109
Figura 57 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 15.	110
Figura 58 Intersección vial 16 (a). Conflictos intersección vial 16 (b).	112
Figura 59 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 16.	113
Figura 60 Intersección vial 17 (a). Conflictos intersección vial 17 (b).	116
Figura 61 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 17.	117
Figura 62 Intersección vial 18 (a). Conflictos intersección vial 18 (b).	119
Figura 63 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 18.	120
Figura 64 Intersección vial 19 (a). Conflictos intersección vial 19 (b).	123
Figura 65 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 19.	124
Figura 66 Intersección vial 20 (a). Conflictos intersección vial 20 (b).	127
Figura 67 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 20.	128
Figura 68 Curvas Isócronas de Accesibilidad Media Global para Manizales, calculadas mediante penalidades por giro subjetivas.	146
Figura 69 Curvas Isócronas de Accesibilidad Media Global para Manizales, calculadas mediante penalidades por giro obtenidas mediante la metodología propuesta.	149
Figura 70 Curvas Isócronas de Gradiente de Ahorro.	152

Lista de gráficas

Gráfica 1 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 1.	63
Gráfica 2 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 1.	64
Gráfica 3 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 2.	67
Gráfica 4 Ojiva porcentual giro a la derecha intersección vial 2.	68
Gráfica 5 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 3.	70
Gráfica 6 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 4.	73
Gráfica 7 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 4.	74
Gráfica 8 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 5.	77
Gráfica 9 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 5.	78
Gráfica 10 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 6.	81
Gráfica 11 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 6.	82
Gráfica 12 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 7.	85
Gráfica 13 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 7.	86
Gráfica 14 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 8.	89
Gráfica 15 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 9.	91
Gráfica 16 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 10.	94
Gráfica 17 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 10.	95
Gráfica 18 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 11.	98
Gráfica 19 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 11.	99
Gráfica 20 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 12.	102
Gráfica 21 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 13.	105
Gráfica 22 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 13.	106
Gráfica 23 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 14.	109
Gráfica 24 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 15.	111
Gráfica 25 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 16.	114
Gráfica 26 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 16.	115
Gráfica 27 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 17.	118
Gráfica 28 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 17.	119
Gráfica 29 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 18.	121
Gráfica 30 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 18.	122
Gráfica 31 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 19.	125
Gráfica 32 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 19.	126
Gráfica 33 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 20.	129
Gráfica 34 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 20.	130
Gráfica 35 Histograma tiempos de giro a la izquierda, análisis general.	133
Gráfica 36 Ojiva porcentual tiempos de giro a la izquierda, general.	133
Gráfica 37 Histograma tiempos de giro a la derecha, análisis general.	135
Gráfica 38 Ojiva porcentual tiempos de giro a la derecha, análisis general.	135
Gráfica 39 Histograma tiempos de giro a la izquierda, intersecciones semaforizadas. .	137
Gráfica 40 Ojiva porcentual tiempos de giro a la izquierda, intersecciones semaforizadas.	138

Gráfica 41 Histograma tiempos de giro a la derecha, intersecciones semaforizadas.	139
Gráfica 42 Ojiva porcentual tiempos de giro a la derecha, intersecciones semaforizadas.	140
Gráfica 43 Histograma de frecuencia giro a la izquierda, intersecciones reguladas mediante PARE o Ceda el Paso.....	141
Gráfica 44 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersecciones reguladas mediante PARE o Ceda el Paso.....	142
Gráfica 45 Histograma de frecuencia giro a la derecha, intersecciones reguladas mediante PARE o Ceda el Paso.....	143
Gráfica 46 Histograma de frecuencia giro a la izquierda, intersecciones reguladas mediante PARE o Ceda el Paso.....	144
Gráfica 47 Histograma de población, curvas isócronas de accesibilidad media global calculadas con penalidades por giro subjetivas.	147
Gráfica 48 Histograma de área, curvas isócronas de accesibilidad media global calculadas con penalidades por giro subjetivas.	147
Gráfica 49 Ojiva porcentual de población y área, curvas isócronas de accesibilidad media global calculadas con penalidades por giro subjetivas.....	148
Gráfica 50 Histograma de población, curvas isócronas de accesibilidad media global calculadas con penalidades por giro obtenidas mediante la metodología propuesta.	150
Gráfica 51 Histograma de área, curvas isócronas de accesibilidad media global calculadas con penalidades por giro obtenidas mediante la metodología propuesta.	150
Gráfica 52 Ojiva porcentual de población y área, curvas isócronas de accesibilidad media global calculadas con penalidades por giro obtenidas mediante la metodología propuesta.	151
Gráfica 53 Histograma de población, curvas isócronas de gradiente de ahorro.....	153
Gráfica 54 Histograma de área, curvas isócronas de gradiente de ahorro.....	153
Gráfica 55 Análisis de cobertura de población y área, Gradiente de ahorro.....	154

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Formato para registro de tiempos de giro en intersecciones viales.	50
Tabla 2 Tabla de frecuencia para análisis estadístico de tiempos de giro.....	52
Tabla 3 Análisis de priorización intersección vial 1.	61
Tabla 4 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 1.....	62
Tabla 5 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 1.	63
Tabla 6 Análisis de priorización intersección vial 2.	65
Tabla 7 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, Intersección Vial 2.....	66
Tabla 8 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 2.	67
Tabla 9 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 3.....	69
Tabla 10 Análisis de priorización intersección vial 4.	71
Tabla 11 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 4.....	72
Tabla 12 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 4.	73
Tabla 13 Análisis de priorización intersección vial 5.	75
Tabla 14 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 5.....	76
Tabla 15 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 5.	77
Tabla 16 Análisis de priorización, intersección vial 6.	79
Tabla 17 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 6.....	80
Tabla 18 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 6.	81
Tabla 19 Análisis de priorización, intersección vial 7.	83
Tabla 20 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 7.....	84
Tabla 21 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 7.	85
Tabla 22 Análisis de priorización, intersección vial 8.	87
Tabla 23 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 8.....	88
Tabla 24 Análisis de priorización intersección vial 9.	90
Tabla 25 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 9.....	91
Tabla 26 Análisis de priorización intersección vial 10.	92
Tabla 27 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 10.....	93
Tabla 28 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 10.	94
Tabla 29 Análisis de priorización intersección vial 11.	96
Tabla 30 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 11.....	97
Tabla 31 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 11.	98
Tabla 32 Análisis de priorización intersección vial 12.	100
Tabla 33 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 12.....	101

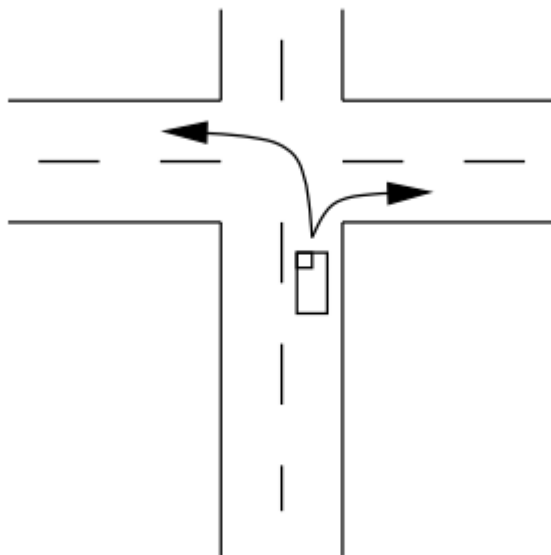
Tabla 34	Análisis de priorización intersección vial 13.....	103
Tabla 35	Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 13.	104
Tabla 36	Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 13.....	105
Tabla 37	Análisis de priorización intersección vial 14.....	107
Tabla 38	Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 14.	108
Tabla 39	Análisis de priorización intersección vial 15.....	110
Tabla 40	Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 15.	111
Tabla 41	Análisis de priorización intersección vial 16.....	112
Tabla 42	Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 16.	114
Tabla 43	Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 16.....	115
Tabla 44	Análisis de priorización intersección vial 17.....	116
Tabla 45	Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 17.	117
Tabla 46	Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 17.....	118
Tabla 47	Análisis de priorización intersección vial 18.....	120
Tabla 48	Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 18.	121
Tabla 49	Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 18.....	122
Tabla 50	Análisis de priorización intersección vial 19.....	123
Tabla 51	Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 19.	124
Tabla 52	Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 19.....	125
Tabla 53	Análisis de priorización intersección vial 20.....	127
Tabla 54	Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 20.	128
Tabla 55	Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 20.....	129
Tabla 56	Resumen de resultados, media aritmética, desviación estándar y número de datos registrados.....	131
Tabla 57	Tabla de frecuencia giro a la izquierda, análisis general.....	132
Tabla 58	Tabla de frecuencia giro a la derecha, análisis general.	134
Tabla 59	Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersecciones semaforizadas.....	136
Tabla 60	Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersecciones semaforizadas.	138
Tabla 61	Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersecciones reguladas mediante PARE o Ceda el Paso.	140
Tabla 62	Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersecciones reguladas mediante PARE o Ceda el Paso.....	142
Tabla 63	Resumen de cálculo de penalidades por giro.	145

1.Introducción

1.1 Penalidades y Restricciones por Giro y su relación en los Modelos de Transportes

Los modelos de transporte ([ver sección 2.2.15](#)) han sido utilizados a lo largo de los años como herramienta para la planificación de las ciudades justificando grandes inversiones en diversos temas como la construcción de nuevas obras de infraestructura vial, implementación de nuevos sistemas de transporte, modificaciones en la red de transportes, entre otras ([Patriksson, 1994](#)). Estos modelos son representaciones simplificadas de la realidad a través de ecuaciones matemáticas los cuales son divididos en modelos de oferta y de demanda, en el caso del transporte ([Ortúzar & Willumsen, 1994](#)). Los modelos de oferta utilizan la red vial como una representación de la oferta ([Añez, De La Barra, & Pérez, 1996](#)) donde se miden diversos factores como los costos de viaje mediante algoritmos que buscan el camino mínimo los cuales a lo largo de los años se han ido modificando buscando soluciones optimas en busca de incrementar su detalle a través de la inclusión de variables propias de la red vial como velocidades de operación, congestión vehicular, penalidades y restricciones de giro, capacidad de las vías, entre otras ([Caldwell, 1961](#); [Dijkstra, 1959](#); [Geisberger & Vetter, 2011](#); [Winter, 2002](#); [Wu, Qin, & Li, 2015](#)).

En el momento de elección de una ruta en la red vial se pueden presentar diferentes opciones a la hora de enfrentar una intersección vial cómo continuar recto o girar a derecha o izquierda según el ángulo de la vía, asimismo pueden existir restricciones de giro por lo que esto produciría la escogencia de una ruta más larga con el fin de salvar dicho obstáculo ([Winter, 2002](#)). En general, la ruta con menos giros se percibe como la óptima ([Winter, 2002](#)), pues los giros representan las discontinuidades en la red ya que por diversas razones como señalización en las vías, regulación por semáforos o intersecciones de múltiples flujos a los vehículos les toma más tiempo girar a izquierda o derecha en la red vial donde incluso existen diferencias visibles entre uno y otro giro, tomando más tiempo el giro a la izquierda que el giro a la derecha ([Figura 1](#)) ([Volker, 2008](#); [Winter, 2002](#)).

Figura 1 Giro a izquierda y derecha en una intersección vial.

Fuente: [Volker, 2002](#), pág. 4

Por ello en diversas investigaciones las penalidades y restricciones de giro (en tiempo de giro o prohibición del movimiento) han sido utilizadas incluyéndose de manera global (penalidad o restricción del giro a la izquierda, derecha o “U” y continuar recto) ([Thériault, Vandersmissen, Lee-Gosselin, & Leroux, 1999](#); [Yiannakoulias, Bland, & Svenson, 2013](#)) en aras de buscar simplicidad en el análisis debido a que sería sumamente complejo incluir las penalidades y restricciones de giro para cada intersección en una red vial compuesta por miles de arcos y nodos, sin embargo, no se cuenta con una metodología de cálculo para cuantificar dichas penalidades, en un tema donde la literatura es escasa ([Thériault et al., 1999](#); [Winter, 2002](#); [Yiannakoulias et al., 2013](#)).

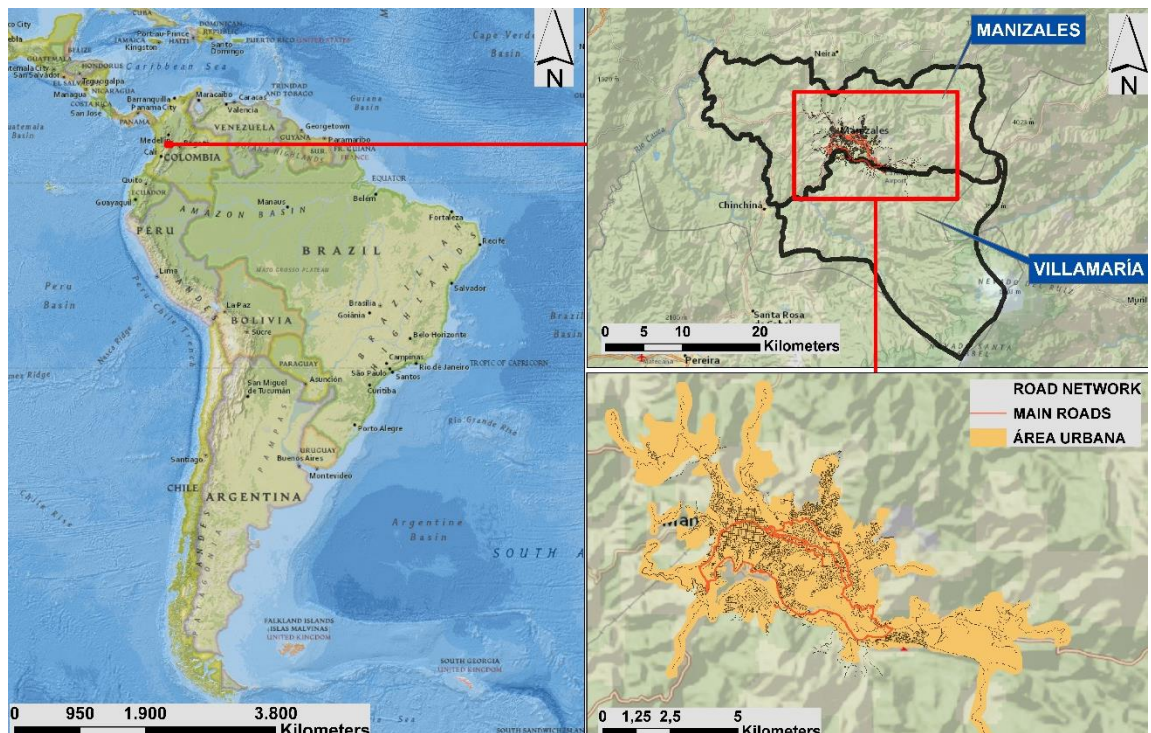
En Manizales, la ciudad donde se ubica el estudio, se han llevado a cabo diversas investigaciones en modelos de oferta a lo largo de los años ([Escobar, Martínez, & Moncada, 2016](#); [Escobar & García, 2012](#); [Moncada, Cardona, & Escobar, 2018](#)) estos modelos, denominados accesibilidad geográfica o territorial, utilizan la red vial de transportes en sí como una representación de la oferta ([Añez et al., 1996](#); [Moncada et al., 2018](#)). Con el fin de acercar dicho modelo a la realidad de la movilidad de la ciudad se han tomado diversas medidas como la obtención de las velocidades en la red mediante la instalación en vehículos de sistemas de posicionamiento global (GPS) ([Younes, Escobar, & Holguín, 2016](#)) y la inclusión de penalidades y restricciones por giro globales en la red, 69 segundos para el giro a la izquierda, 60 segundos para el giro a la derecha, se prohíbe el giro en “U” y no se penaliza al continuar recto ([Perilla, Escobar, & Cardona, 2018](#)). Sin embargo, estas penalidades no poseen una base científica como si la tiene el cálculo de velocidades de la

red vial, la cual es un promedio de datos tomada durante varios meses ([Younes et al., 2016](#)). Por ello en esta investigación se busca calcular las penalidades por giro a izquierda y derecha para la ciudad de Manizales desde una metodología científica que permita su implementación en otras ciudades y lugares donde vayan a llevar a cabo modelos de transporte como la accesibilidad. Asimismo, medir las diferencias entre el modelo de accesibilidad calculado con las penalidades usadas anteriormente y el calculado utilizando las penalidades obtenidas en la presente investigación.

1.2 Manizales, Zona de Estudio

Manizales, capital del departamento de Caldas, está ubicada en el centro occidente Colombiano en las coordenadas geográficas $5^{\circ} 03' 58''$ de latitud norte y $75^{\circ} 29' 5''$ de longitud oeste, sobre la cordillera central a una altura promedio de 2150 metros sobre el nivel del mar por lo que posee una topografía abrupta y escarpada que dificulta los procesos de expansión y urbanismo ([Robledo, 1996](#)). En el área urbana cuenta con un área de 3498 hectáreas y una población para 2017 de 371 307 habitantes, según las proyecciones de población realizadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) ([DANE, 2010](#)), por lo que su densidad es de 106,1 habitantes por hectárea. Además cuenta con una división en 114 barrios distribuidos en 11 comunas ([Alcaldía de Manizales, 2017c](#)).

Figura 2 Localización geográfica de la zona de estudio.

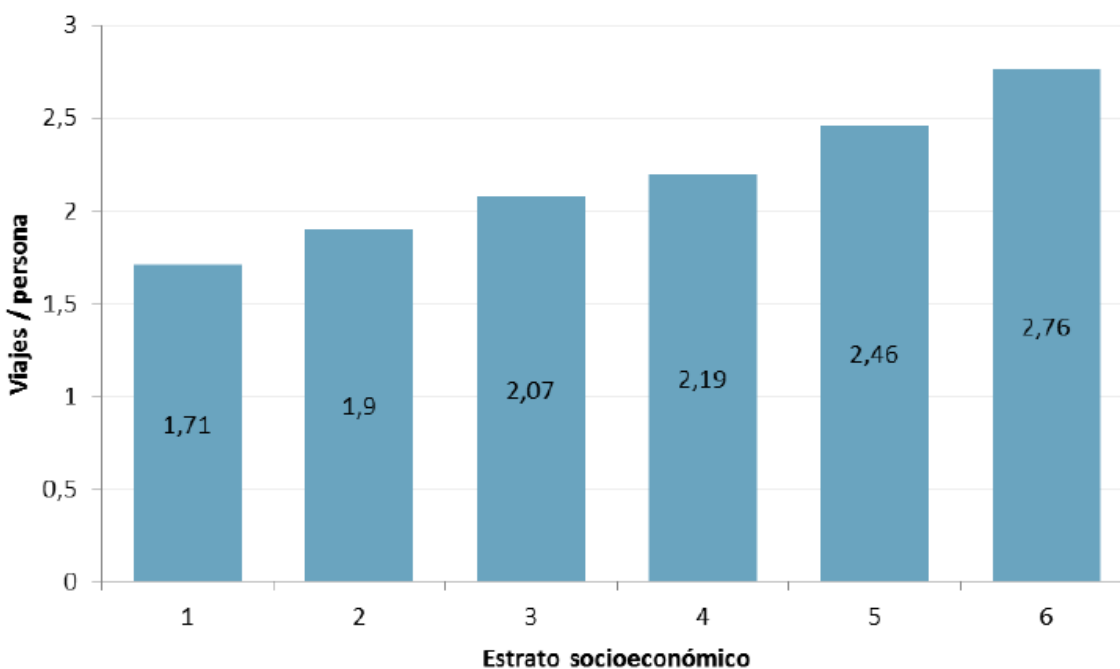


Fuente: Elaboración propia.

Manizales hace parte de la región centro sur de Caldas, conformada por los municipios de Villamaría, Chinchiná, Palestina y Neira, con los cuales se han realizado diversos esfuerzos a lo largo de los últimos años con el fin de conformar un área metropolitana legalmente constituida ([Escobar, Cardona, & Moncada, 2018a](#)) y aunque esto no ha podido ser posible debido a diversas situaciones, es imposible analizar Manizales sin tener en cuenta la influencia del municipio de Villamaría (48 636 habitantes) debido a su cercanía geográfica y las conexiones sociales que se han creado entre sus habitantes, los cuales realizan sus diversas actividades (educación, trabajo, salud, recreación, entre otras) en uno u otro municipio existiendo un constante tráfico y flujo, el cual es soportado por un sistema de transporte público colectivo urbano y cable aéreo, que funciona entre ambos como si de una sola ciudad se tratase ([Escobar, Tapasco, & Giraldo, 2015](#)).

Manizales cuenta con una movilidad donde se realizan 749 634 viajes diarios en todos los modos de transporte, es decir, un promedio de 6,86 viajes por hogar, mientras en Villamaría este promedio es de 5,9 viajes por hogar. Asimismo, existe una amplia disparidad entre estratos socioeconómicos donde los estratos altos realizan un mayor número de viajes promedio por hogar y por persona respecto a los estratos medio y bajo ([ver figura 3](#))([Alcaldía de Manizales, 2017c](#)).

Figura 3 Viajes promedio por persona según estrato socio económico.

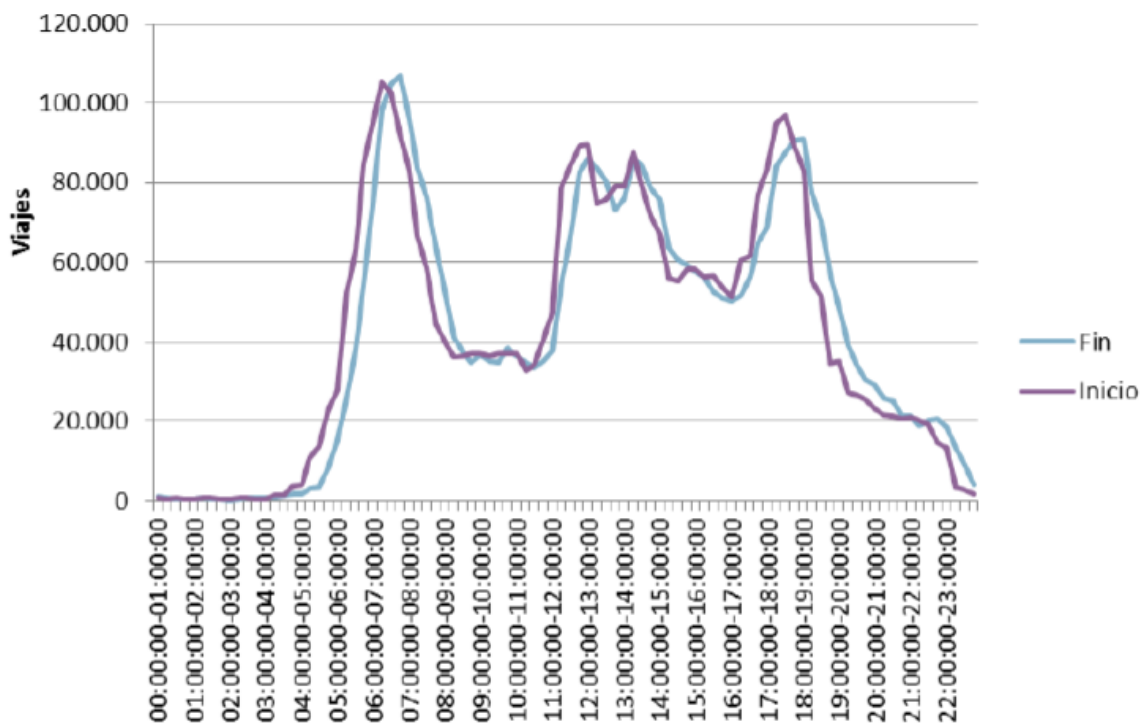


Fuente. [Plan Maestro de Movilidad de Manizales. Línea base y diagnóstico de la situación actual de la movilidad de Manizales, 2017](#), p. 196.

Por otro lado, en el perfil de viajes a lo largo del día que se observa en la figura 4 se puede notar como existen 4 picos a largo del día. El primero entre las 6:30 y 7:30, que

corresponden a los viajes que generalmente son desde el hogar hasta el lugar de trabajo o centros educativos. El segundo y tercer pico, entre 11:45 y 12:45 y 13:30 y 14:30 respectivamente, corresponden a los viajes para ir a almorzar luego del trabajo o el estudio y volver a sus actividades. El cuarto pico, entre las 17:30 y 18:30 corresponde a los viajes realizados para volver al hogar. Este perfil nos indica que gran número de personas tienen el suficiente tiempo al medio día para volver a sus hogares para almorzar, situación imposible en otras ciudades de mayores proporciones como Bogotá, Cali o Medellín debido a la longitud de los viajes y a la creciente congestión ([Alcaldía de Manizales, 2017c](#)).

Figura 4 Perfil a lo largo del día de los viajes.

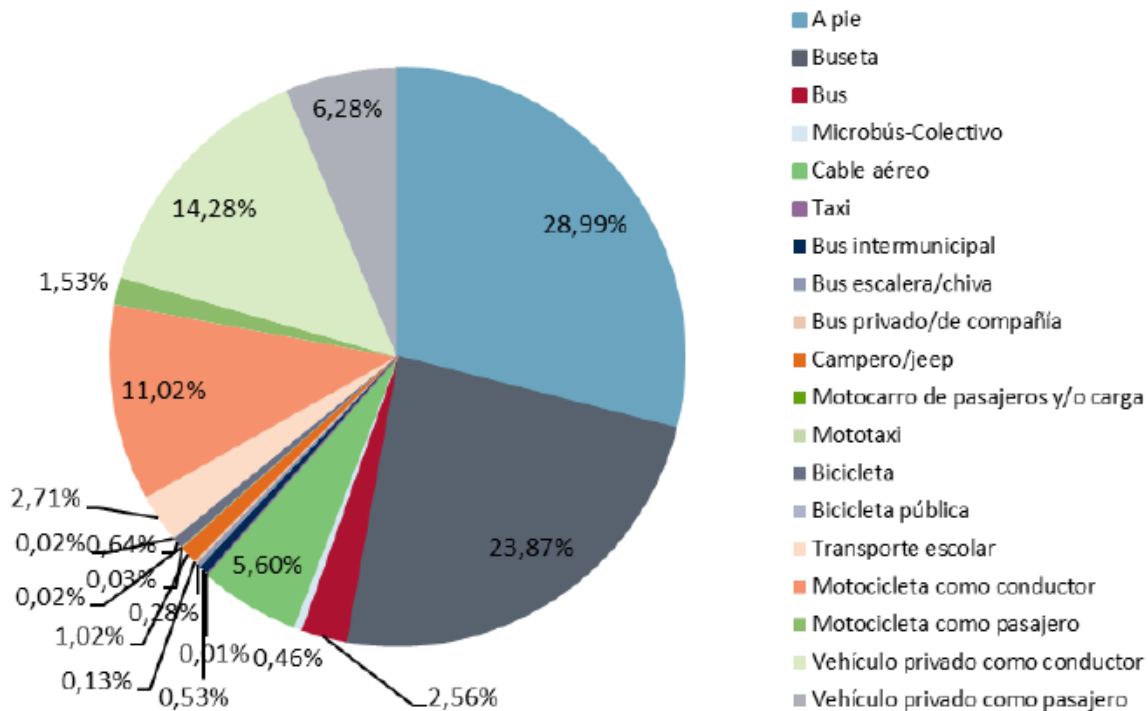


Fuente. [Plan Maestro de Movilidad de Manizales. Línea base y diagnóstico de la situación actual de la movilidad de Manizales](#), 2017, p. 209.

En cuanto a la partición modal de los viajes, los modos sostenibles de transporte como la bicicleta, caminata y transporte público representan cerca del 58% de los viajes mientras el vehículo privado como los carros y motocicletas alcanzan cerca del 33% de los viajes ([Alcaldía de Manizales, 2017c](#)). A pesar de que el porcentaje de los medios alternativos de transporte es superior a la del vehículo privado la ciudad ha sufrido grandes complicaciones en movilidad en los últimos años debido al crecimiento desbordado del parque automotor de vehículos privados y la disminución del número de pasajeros que usan transporte público ([Alcaldía de Manizales, 2017c](#); [Cardona, Escobar, & Moncada, 2017](#)). El porcentaje de los usuarios de bicicleta se ha mantenido los últimos años a pesar

de la puesta en marcha del Sistema Público de Bicicletas ([Zuluaga, Escobar, & Younes, 2018](#)).

Figura 5 Partición modal de los viajes.



Fuente. [Plan Maestro de Movilidad de Manizales. Línea base y diagnóstico de la situación actual de la movilidad de Manizales](#), 2017, p. 211.

Por otro lado, en Manizales las medidas de accesibilidad han sido utilizadas para diversos temas de planificación urbana, como por ejemplo, para medir el impacto de nuevas obras de infraestructura vial ([Moncada et al., 2018](#); [Perilla et al., 2018](#)), para medir la cobertura de equipamientos como los centros de ambulancia ([Escobar, Holguín, & Zuluaga, 2016](#)), las estaciones de bicicletas públicas ([Cardona, Zuluaga, & Escobar, 2017](#)) y centros comerciales ([Zuluaga & Escobar, 2017b](#)), entre otras.

Entre los objetivos de esta investigación se encuentra desarrollar una metodología para el cálculo de las penalidades por giro utilizadas en los modelos de oferta de transporte como la accesibilidad media global mediante el registro de los tiempos promedio de giro a derecha e izquierda de una muestra aleatoria de vehículos en algunas intersecciones viales propuestas en la ciudad de Manizales mediante un análisis de priorización. Para lograr esto, se debe actualizar la red vial de la ciudad con la ayuda del software ArcGis, escoger mediante un análisis de priorización las intersecciones viales a analizar para su posterior georreferenciación en ArcGis y registro de videos lo que nos permitirá tomar los tiempos de giro a izquierda y derecha en los diferentes movimientos observados. Con esto,

se podrán calcular los tiempos promedio de giro y establecer las penalidades por giro para la ciudad de Manizales. Por último, se realizará el cálculo de la accesibilidad media global con estas penalidades por giro y se comparará con el resultado de la accesibilidad media global medida con las penalidades por giro utilizadas en investigaciones previas, esto permitirá cuantificar la importancia de las penalidades por giro y su peso en el modelo de transporte analizado.

A continuación, se presenta el marco teórico, donde se realiza el estado del arte referente al tema de las penalidades por giro en los modelos de transporte y el marco conceptual donde se definen los diferentes conceptos utilizados en la investigación. Después, se describe la metodología de investigación para luego presentar los principales resultados obtenidos. Por último, se enumeran las conclusiones de la investigación.

2. Marco Teórico

2.1 Estado del arte

Las penalidades por giro en los modelos de transporte han estado relacionadas con la representación de las redes de viales a través de la teoría de grafos ([Bunge, 1962](#)), ([ver sección 2.2.20](#)). De manera clásica estas redes se construyen a través de un grafo directo, compuesto por nodos y arcos, lo que permitía la aplicación de diversos algoritmos para encontrar los caminos mínimos en la red. El primero de ellos fue desarrollado por Dijkstra ([1959](#)) ([ver sección 2.2.21](#)), aunque este no permitía la inclusión de penalidades o restricciones por giro. A través de diversas transformaciones en el grafo de la red vial es posible incluir dichas penalidades. Caldwell ([1961](#)) desarrolló una metodología que modificaba el grafo de la red vial con el fin de incluir las penalidades por giro, teniendo en cuenta que en una red con dichas penalidades la ruta mínima entre i y j debe ser diferente a entre j e i . Luego, Añez et. al. ([1996](#)) presentaron una forma de representar las redes de transporte denominada “Dual Graph” la cual había sido utilizada en numerosas redes de transporte con el fin de incluir penalidades y restricciones en los giros debido a que la forma clásica a través del grafo directo requería una mayor complejidad para incluirlas, concluyendo que dicha transformación generaba utilidad en la modelación de transportes. Asimismo, Winter ([2002](#)) investigó los costos de giro en los grafos, encontrando que desde Caldwell ([1961](#)) existía muy poca literatura que abordara este tema. También, definió los giros como la representación de las discontinuidades en la red vial donde una ruta se percibe como óptima cuando no existen muchos cambios de dirección. Según Winter ([2002](#)), los costos de giro toman relevancia en situaciones relacionadas con la señalización

vial, aceleración y desaceleración en intersecciones viales, giros a izquierda o derecha de vehículos, entre otras. Además, presentó una contribución para la optimización de “Dual Graph” denominada “Pseudo dual-graph”. Posterior a ellos, se presentaron múltiples investigaciones relacionadas con la concepción del grafo y la optimización del algoritmo de Dijkstra con el fin incluir las penalidades y restricciones por giro en los modelos de transporte ([Bauer et al., 2008](#); [Delling, Sanders, Schultes, & Wagner, 2009](#); [Geisberger & Vetter, 2011](#); [Schultes, 2008](#); [Wu et al., 2015](#)).

Los avances relacionados con la construcción del grafo de la red de transportes y optimización del algoritmo de caminos mínimos con el fin de incluir las penalidades y restricciones por giro desembocaron en la inclusión de estos en los modelos de transporte ([ver sección 2.2.15](#)). Por esto, Thériault, Vandersmissen, Lee-Gosselin y Leroux ([1999](#)) decidieron incluir penalidades y restricciones por giro globales a través del software TRANSCAD, con el fin de medir los tiempos de viaje a través de la red vial en la ciudad de Quebec (Canadá) y complementar el análisis de demanda del transporte. En este estudio se utilizó una penalidad de 24 segundos para el giro a la izquierda, 12 segundos para el giro a la derecha, 6 segundos al momento de continuar recto y se restringe el giro en U. Debido al tamaño de la red vial, donde existen miles de nodos y arcos decidieron no incluir las penalidades y restricciones de manera particular en cada intersección vial. Luego, Yiannakoulis, Bland y Svenson ([2013](#)) compararon dos métodos para la obtención de los tiempos de viaje en la red transportes entre pares origen-destino. El primero calcula mediante las velocidades máximas permitidas en cada arco y el segundo incluye variables de congestión vehicular en la red y la inclusión de penalidades y restricciones por giro. Dichos métodos se incluyen en un modelo de accesibilidad basado en gravedad ([ver sección 2.2.18](#)) donde se midió la oferta de equipamientos de primeros auxilios en Alberta (Canadá). En este caso, se utilizó 30 segundos para el giro a la izquierda, 7,5 segundos para el giro a la derecha, 15 segundos al momento de continuar recto y se restringió el giro en U. En este caso coinciden con Thériault et al. ([1999](#)) afirmando que la complicación de utilizar las penalidades por giro globales radica en la diferencia que existe en cada intersección vial y que no existe una metodología adecuada para la cuantificación de las penalidades. Además, afirman como hipótesis que no hay una existe una diferencia apreciable entre los resultados de las zonas más accesibles de la ciudad debido a que los tiempos de viaje son una variable del modelo y no es la única medida. Sin embargo, estos tiempos de viaje, observándose particularmente, son afectados por las variables de tiempo de giro.

En la zona de estudio, se han llevado a cabo diversas investigaciones ([Cardona et al., 2017](#); [Escobar, Cardona, & Moncada, 2018b](#); [Escobar et al., 2015](#); [Escobar & Garcia, 2011, 2012](#); [Perilla et al., 2018](#); [Younes et al., 2016](#)) utilizando medidas de accesibilidad, modelo de oferta de transportes ([ver sección 2.2.17, 2.2.18 y 2.2.19](#)), donde se utilizan los diversos algoritmos de caminos mínimos que incluyen las penalidades y restricciones por giro para el cálculo del tiempo de viaje. En este caso, los investigadores determinaron de manera subjetiva las penalidades por giro a la izquierda en 69 segundos, por giro a la derecha en 60 segundos y se restringe el giro en U. Asimismo, no se registra penalidad al continuar

recto en la red de transportes. Comparadas con las penalidades utilizadas en investigaciones anteriores ([Thériault et al., 1999](#); [Yiannakoulias et al., 2013](#)) estos valores resultan un poco elevados, por ello la necesidad de cuantificar estos valores para la ciudad de Manizales sumado al desarrollo de una metodología replicable a otras ciudades ya que según Yiannakoulias et al. ([2013](#)) no se cuenta con un método adecuado para ello.

2.2 Marco Conceptual

2.2.1 Intersecciones Viales

Las intersecciones viales son nodos fundamentales en la red vial urbana representada por un área donde se comparten dos o más vías y está diseñada para que los vehículos se muevan en diversas direcciones con mayor facilidad debido a que en esta se encuentran gran cantidad flujos produciendo fácilmente congestión vehicular (aumentando en 30% el tiempo de viaje de los vehículos), retraso vehicular por los tipos de regulación de tráfico y los diferentes giros que se deben realizar, así como el aumento en la accidentalidad vial ya que allí se producen hasta un 50% de los accidentes de tránsito ([AASHTO, 2001](#); [Li, Zhao, & Dong, 2014](#); [Yu, Wang, & Gong, 2013](#)). Para esta investigación, se clasificarán las intersecciones viales en dos tipos principales: intercambiadores viales e intersecciones viales a nivel. Los intercambiadores viales ([ver Figura 6](#)) corresponden a grandes obras de infraestructura vial que minimizan los conflictos directos entre vehículos y que poseen costos monetarios elevados ([Perilla et al., 2018](#)). Por otro lado, las intersecciones a nivel ([ver Figura 6](#)) son aquellas donde los flujos se encuentran en el mismo plano, por lo que la regulación de la misma está dada por semáforos, señalización horizontal y vertical (señales tipo PARE y CEDA el PASO) o en algunos casos poseen flujos diferenciados para algunos movimientos. En esta investigación se analizarán intersecciones a nivel por lo que en el siguiente apartado será abordada de manera más específica su clasificación.

Figura 6 Intersección vial a nivel (izquierda) e Intercambiador vial (derecha), en Manizales, Caldas.



Fuente. Elaboración propia.

2.2.2 Intersecciones Viales a Nivel

Son aquellas donde el área de encuentro para los diferentes flujos y vías se encuentra en el mismo plano. En el ámbito investigativo existen diversas formas para clasificar las intersecciones viales ([AASHTO, 2001](#); [Serbu, Opruța, & Socaciu, 2014](#)). Para nuestro caso se tendrán tres clasificaciones principales. En primer lugar, según el tipo de canalización de tráfico. En segundo lugar, por el tipo de regulación de tráfico y por último según el número de ramales.

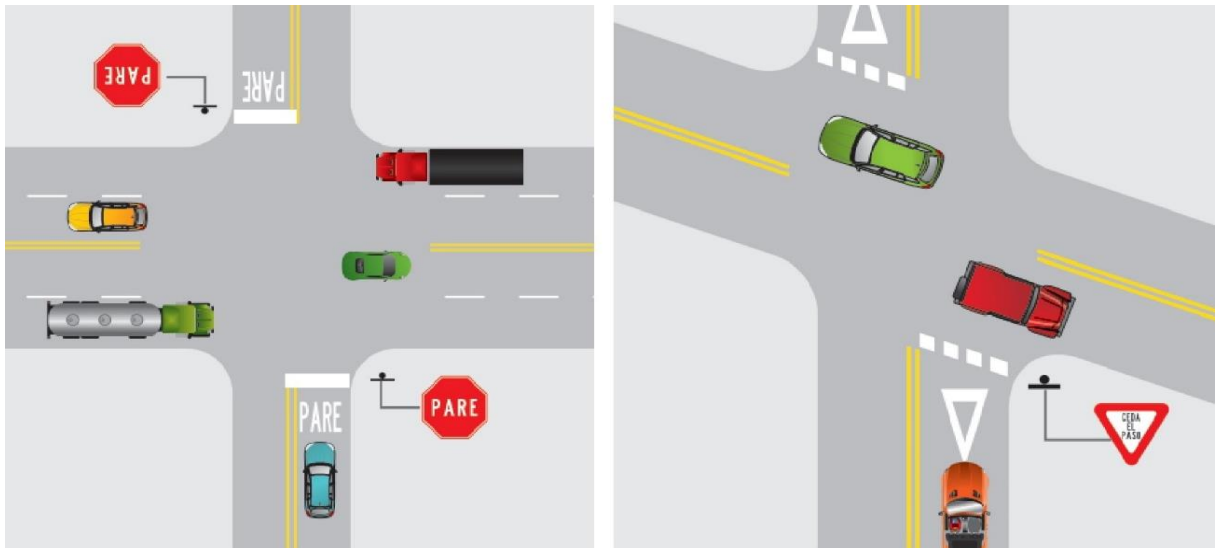
2.2.3 Canalización de Tráfico

En esta clasificación se tendrá en cuenta el tipo de canalización de tráfico que posee la intersección vial: i) Intersección simple, en la cual no se tiene una canalización visible para los diferentes flujos vehiculares por lo que los flujos comparten espacio en los diferentes carriles, ii) intersección con canalización mediante señalización donde se tiene un principio de separación de flujos mediante señalización, principalmente para separar los flujos de giro a la izquierda o derecha, e iii) intersección con canalización mediante infraestructura donde se tiene una separación de flujos mediante estructuras.

2.2.4 Tipo de Regulación de Tráfico

En esta clasificación se tendrá en cuenta los diferentes tipos de regulación de tráfico presentes en las intersecciones y cruces viales colombianos según el Manual de Señalización Vial desarrollado por el Ministerio de Transporte en el 2015 donde, a menos que se presentes muy bajos volúmenes de flujo vehicular, se requiere una señalización vertical, horizontal o semaforización donde se establezca la prioridad de flujos ([Ministerio de Transporte, 2015](#)). En primer lugar, los semáforos son dispositivos de señalización mediante los cuales se regulan vehículos, bicicletas y peatones en las vías, donde se da prelación de paso a diversos flujos según el volumen vehicular y las fases de tiempo programadas ([Ministerio de Transporte, 2015](#)), por lo que las intersecciones viales reguladas por semáforo ([ver Figura 8](#)) serán uno de los tipos analizados en esta investigación. Por otro lado, tenemos el análisis de las intersecciones reguladas por señal tipo PARE ([Figura 7 a](#)) o CEDA el PASO ([Figura 7 b](#)).

Figura 7 Intersecciones viales reguladas por señal de PARE (a) y CEDA el PASO (b).



Fuente: Manual de Señalización Vial Colombia, 2015.

Figura 8 Intersección vial regulada por semáforo.



Fuente: Elaboración Propia.

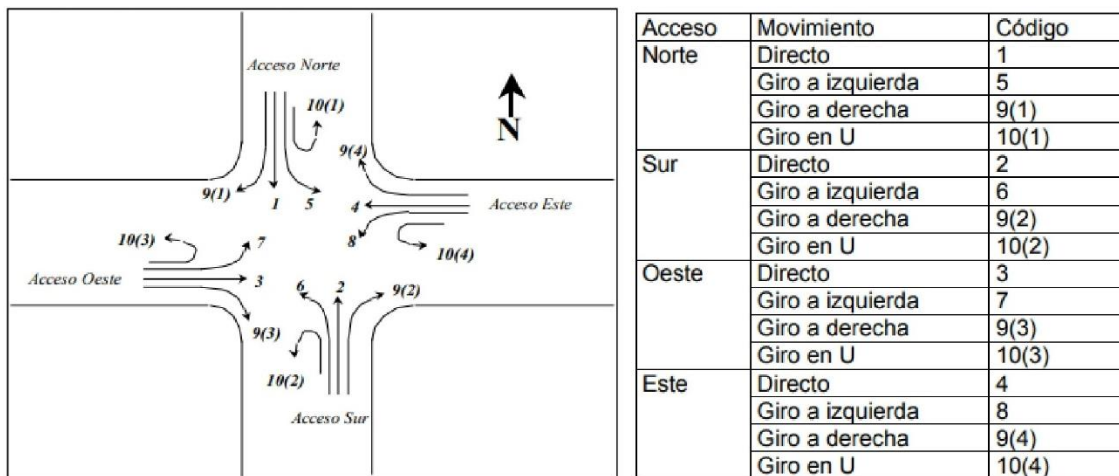
2.2.5 Número de Ramales

Esta clasificación se refiere al número de vías que se cruzan en la intersección existiendo intersecciones desde 2 ramales hasta 6 o más ramales. En este sentido, también se puede derivar una clasificación extra según la forma que tengan los diferentes ramales respecto al nodo de intersección, formándose intersecciones tipo “Y” , “T” o cruz ([Serbu et al., 2014](#)).

2.2.6 Nomenclatura de Movimientos en Intersecciones Viales

En este apartado es importante definir la nomenclatura a utilizar para nombrar los movimientos que se pueden presentar en una intersección vial, es decir, el nombre que se le da a cada movimiento para que su trato se realice de una forma más clara y concisa. Para esta investigación se utilizará la norma alemana RILSA ([Richtlinien für Lichtsignalanlagen, 1992](#)), utilizada frecuentemente en Colombia para análisis y diseño de intersecciones viales, el cual posee ciertas recomendaciones metodológicas para el diseño de intersecciones semaforizadas ([Alzate Botero & Hurtado Quintero, 2007](#); [Robles, Nañez, & Quijano, 2009](#)). En la [figura 9](#), se observa la nomenclatura utilizada para nombrar los movimientos en una intersección vial simple de cuatro ramales según la norma RILSA.

Figura 9 Nomenclatura de movimientos RILSA.



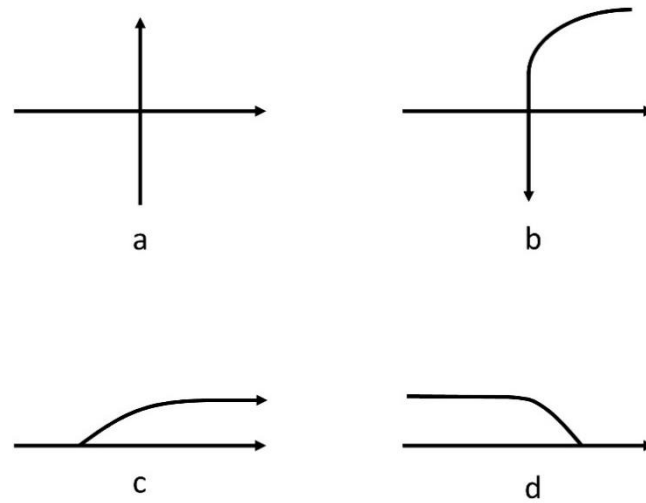
Fuente: Cal & Mayor y Asociados como citó en Garzón Barahona A. y Garzón Barahona J. ([2014](#)).

2.2.7 Puntos de Conflicto

Los puntos de conflicto que se pueden presentar en las intersecciones viales a nivel son sitios de potencial accidentalidad que se relacionan directamente con el volumen vehicular y con las demoras en los tiempos de viaje. Los puntos de conflicto que se pueden presentar

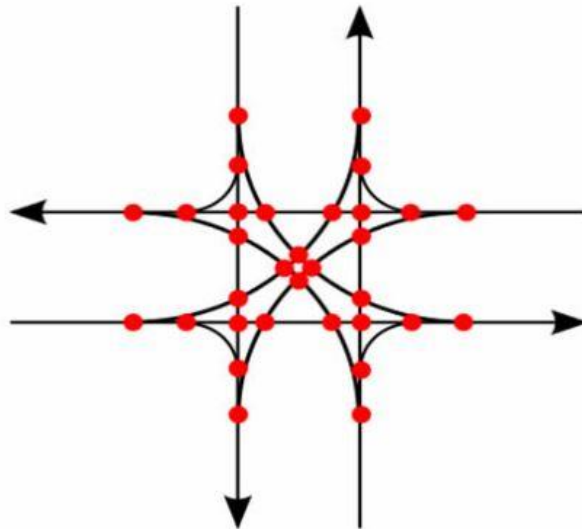
en una intersección entre vehículos son de cuatro tipos: i) conflicto por tráfico directo donde se cruzan dos trayectorias ([Figura 10 a](#)), ii) conflicto por cruce entre tráfico directo y giro a la izquierda ([Figura 10 b](#)), iii) conflicto por divergencia, donde dos trayectorias comunes toman rutas distintas ([Figura 10 c](#)) y iv) conflicto por convergencia, caso contrario al anterior, donde dos o más trayectorias se unen formando un flujo común ([Figura 10 d](#)) ([Miramontes, Vidaña, & Rodríguez, 2010](#)).

Figura 10 Conflictos en intersecciones viales a nivel.



Fuente: Elaboración Propia.

En la [Figura 11](#) se observan el conjunto de puntos de conflicto que se presentan en una intersección vial a nivel, de cuatro ramales.

Figura 11 Conjunto de conflictos en una intersección de cuatro ramales.

Fuente: Álvarez como se citó en [Miramontes et. al. \(2010\)](#)

Finalmente, en esta investigación se utilizará la siguiente nomenclatura para los conflictos presentes en las intersecciones evaluadas.

Figura 12 Nomenclatura de conflictos en una intersección vial.

Conflictos.		
Conflictos por cruce	Tráfico directo	
	Cruces de giro a la izquierda	
	Tráfico directo y giro a la izquierda	
Conflictos por convergencia		
Conflictos por divergencia		
Conflictos con peatones		

Fuente: Elaboración Propia.

2.2.8 Sistema de Movilidad Urbano

Este apartado se refiere al sistema de movilidad urbano como un sistema estructurante del territorio municipal, el cual es determinado según el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) o Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT), los cuales en términos general son instrumentos de planificación que deben formular los municipios, determinados por el Decreto 879 de 1998 según el número de habitantes del municipio donde se debe formular EOT para municipios con población menor a 30 000 habitantes, PBOT para municipios con población entre 30 000 y 100 000 habitantes, mientras que los POT se realizan en ciudades generalmente grandes y consolidadas con más de 100 000 habitantes. En general el sistema de movilidad urbano define una clasificación para las vías que componen la red vial urbana de la ciudad y es importante para definir la ubicación de las intersecciones viales propensas a análisis. Para esta investigación se utilizará la siguiente clasificación de sistema de movilidad urbano, sin embargo, se recomienda revisar el POT, PBOT o EOT presente en cada municipio para definir la clasificación.

2.2.9 Vía Arteria Principal

Son aquellas vías que poseen un alto volumen vehicular debido a que conectan gran cantidad de los viajes en la ciudad, poseen un diseño geométrico adecuado, que garanticen un tráfico y velocidades adecuadas ([Alcaldía de Manizales, 2017b](#); [Transportation Research Board, 2000](#)). Para la zona de estudio se genera un anillo de movilidad, conformado por las principales vías arterias principales, entre las que se encuentran la Avenida Santander, Avenida Panamericana, Avenida Paralela, Avenida Kevin Ángel, entre otras ([Moncada et al., 2018](#)).

2.2.10 Vía Arteria Secundaria

Estas vías se convierten en un soporte para las vías arterias principales distribuyendo el flujo entre estas por lo que deben tener un diseño geométrico adecuado ([Alcaldía de Manizales, 2017b](#)).

2.2.11 Vía Colectora

Estas vías conectan las vías arterias principales y secundarias con las zonas residenciales, institucionales y recreacionales de la ciudad ([Alcaldía de Manizales, 2017b](#)).

2.2.12 Vía Local

Estas vías se pueden ver desde dos perspectivas diferentes. En primer lugar, como aquellas que brindan la entrada a las propiedades y en segundo lugar como las vías que no se encuentran clasificadas en ninguna de las clasificaciones anteriores. Cabe destacar

que en el sistema de movilidad urbana, según la clasificación de cada municipio, pueden aparecer vías paisajísticas, vías peatonales y semi-peatonales entre otras ([Alcaldía de Manizales, 2017b](#)).

2.2.13 Métodos Estadísticos en Ingeniería de Tránsito

En este punto se hace necesario definir los diferentes conceptos utilizados para el análisis de los datos tomados en campo con el fin de interpretarlos desde un punto de vista estadístico. Para ello, se utilizarán las definiciones dadas por Schwar y Huarte (1975) en su libro “Métodos Estadísticas en Ingeniería de Tránsito” y por Cal y Mayor y Cárdenas (2007) en su libro “Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y aplicaciones”. En primer lugar, se define que cuando el número de datos (m) sea inferior a 25 se utilizarán las fórmulas que se tienen a continuación para, la media aritmética (\bar{x}) (Ecuación 1) y desviación estándar (s) (Ecuación 2), los cuales son los análisis estadísticos fundamentales para esta investigación.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m} \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{m}} \quad (2)$$

Por otro lado, cuando el número de datos (m) es igual o superior a 25 se utilizarán las fórmulas para datos agrupados donde se utiliza la tabla de frecuencias como método para organizar los datos. En esta se utiliza la regla de Sturges para determinar el número de intervalos de frecuencia (Hyndman, 1995; Sturges, 1926) (Ecuación 3), donde además se tiene la marca de clase (\bar{x}_i), la frecuencia absoluta (f_i), frecuencia absoluta acumulada (FIA), frecuencia relativa (FR) y frecuencia relativa acumulada (FRA). Asimismo, se tienen las fórmulas para: la media aritmética (\bar{x}) (Ecuación 4), desviación estándar (s) (Ecuación 5).

$$I = 1 + 3,3 * \text{Log} (n) \quad (3)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^m f_i * \bar{x}_i}{m} \quad (4)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m f_i * \bar{x}_i^2 - \frac{[\sum_{i=1}^m f_i * \bar{x}_i]^2}{m}}{m}} \quad (5)$$

2.2.14 ¿Qué es un modelo?

Un modelo es una representación simplificada de la realidad el cual busca interpretar de la manera más adecuada y con la mayor claridad posible los diferentes escenarios, reduciendo su complejidad y diversidad alcanzando niveles de entendimiento adecuados para el análisis. Además, en estos se procura reproducir las características más importantes y relevantes del escenario a analizar ([Ortúzar & Willumsen, 1994](#)).

Por otro lado, los modelos pueden dividirse en dos grandes tipos: los físicos y los abstractos. Los modelos físicos, como su nombre lo infieren, muestran la representación física y mecánica, a menor escala, del escenario real que se quiere analizar y probar. En estos, se busca replicar de la manera más exacta posible los materiales y las condiciones de operación a las cuales estará expuesto el producto final, probando el diseño, analizándolo y buscando mejoras en este ([Pérez, 2013](#)). En la ingeniería se han utilizado los modelos físicos en diferentes campos como: la ingeniería hidráulica con el diseño de hidroeléctricas y presas ([Balairón Pérez, López, Morán, Ramos, & Toledo, 2014](#)), investigación del comportamiento de ríos y cauces ([Olarte & Aldana, 2010](#)), la ingeniería estructural con la puesta a prueba de diseños a la amenaza eólica en túneles del viento ([Natalini, Marighetti, & Natalini, 1999](#)), amenaza sísmica en mesa vibratoria, además, en la geotecnia se han realizado investigaciones con el fin de simular el comportamiento de distintos materiales ([Ling et al., 2003](#)) y estructuras como los terraplenes ([Thorel, Ferber, Caicedo, & Khokhar, 2011](#)) y túneles ([Duque, 2017](#)). Por otra parte, los modelos abstractos, al ser puramente teóricos y basados en fórmulas matemáticas, son la representación de teórica del funcionamiento de nuestro sistema de interés. La mayoría de modelos físicos parten y se fundamentan desde las bases de los modelos abstractos u teóricos. En otros casos, como en los modelos del transporte, estos son fundamentalmente abstractos debido a su gran fundamento matemático que trata de replicar nuestro sistema de interés (redes de transporte, sistemas de transporte, viajes diarios de las personas, logística de entrega) y el comportamiento humano mediante ecuaciones teóricas ([Ortúzar, 2000](#); [Ortúzar & Willumsen, 1994](#)).

2.2.15 Los Modelos del transporte

A lo largo del tiempo, el transporte ha ocupado un lugar fundamental en la planificación y construcción de la ciudad, debido en gran medida a que los habitantes deben desplazarse de un lugar a otro de la ciudad a través de la red vial para satisfacer diferentes actividades como: el trabajo, la recreación, educación, entre otros. Por ello es indispensable hacer un análisis de la infraestructura actual con el fin de prever inversiones futuras y políticas operativas eficientes ([Patriksson, 1994](#); [Wright & Ashford, 1989](#)).

Después de la segunda mitad del siglo XX, las ciudades comenzaron a sufrir de las externalidades del transporte, congestión, contaminación auditiva y polución, alta accidentalidad, debido en gran medida a una incorrecta planificación del transporte y la

ciudad cuyo enfoque tradicional era proveer infraestructura en beneficio del vehículo privado ([Owens, 1995](#)).

De esta manera, a través de los años, la planificación de las ciudades y del transporte ha evolucionado ([Te Brömmelstroet & Bertolini, 2011](#)). Los primeros investigadores tomaban un enfoque en el cual se calcula y proyectaba una demanda en el tiempo, para así generar soluciones que llevaran a suplir la demanda futura, en el mayor de los casos mediante nuevas obras de infraestructura vial enfocadas a dar prioridad al vehículo privado, como ampliación de vías, nuevas autopistas y conexiones a desnivel ([Adams, 1981](#); [Tyme, 1978](#)). Esta visión puramente clásica de la planificación denominada “predecir y proveer”, se ha transformado hasta alcanzar la visión de “predecir y prevenir” donde se busca suplir la proyección de la demanda de los años futuros mediante políticas y acciones que sean más eficientes en el tiempo ([Marvin & Guy, 1999](#); [Owens, 1995](#)). Más adelante, los avances se enfocaron en alcanzar una planificación sustentable, de la mano de la movilidad sostenible en busca de vencer el paradigma clásico de la planificación ([Banister, 2008](#)). Otro paradigma clásico de la planificación y los modelos del transporte era su enfoque institucional, donde se tenía la creencia que existían pocas partes involucradas en un problema que afectaba a miles de personas y que por el contrario, es una situación donde existen múltiples instituciones involucradas desde el estado, la empresa privada, hasta los mismos ciudadanos ([Willson, 2001](#)). Todos estos enfoques, que han evolucionado a través del tiempo, hacen de la planificación del transporte y del territorio un problema complejo, donde la modelación del transporte a través de las ecuaciones y presunciones matemáticas, se convierten en una herramienta poderosa para el planificador ([Patriksson, 1994](#)). A continuación se presentan los dos tipos generales de modelación del transporte, la modelación de la demanda y la modelación de la oferta ([Ortúzar & Willumsen, 1994](#)). Esta última será utilizada para mostrar la importancia de las penalidades por giro en estos modelos a través de la cuantificación de la accesibilidad media global para la zona de estudio.

2.2.16 Modelos de Demanda

Estos modelos tratan de responder a la demanda causada por el transporte. Para estudiar correctamente la demanda se debe tener en cuenta las distintas características que posee. En primer lugar, es, derivada, es decir, es producto de la satisfacción de una necesidad, en este caso los viajes debido a actividades específicas como el trabajo, la educación, el comercio, etc... Por lo que un buen sistema de transporte debe satisfacer estas necesidades de viaje en la ciudad ([Ortúzar & Willumsen, 1994](#); [Wright & Ashford, 1989](#)).

En segundo lugar, la demanda del transporte es altamente cuantitativa y diferenciable, lo que amplía el espectro de análisis a diferentes horarios en el día (horario pico y horario valle), modos de transporte (vehículo privado, motocicleta y automóvil, vehículos de carga, transporte público, metro, buses de carril rápido, colectivos tradicionales, cable aéreo) junto a las velocidades de operación y capacidades particulares a cada modo. Tampoco se

puede dejar de lado el transporte no motorizado, fundamentalmente la caminata y la bicicleta ([Mitullah, Vanderschuren, & Khayesi, 2017](#); [Tolley, 2003](#)).

En tercer lugar, la demanda es espacial ya que ocupa un lugar geográfico en la ciudad y los viajes de las personas se efectúan de un punto a otro. Generalmente comienzan en el hogar y se dirigen a los empleos e instituciones educativas como colegios y universidades. En la actualidad se demostró que hasta un tercio de los viajes tienen por motivos ir de compras de manera cotidiana o no cotidiana, el ocio y la diversión, pasear, visitar amigos o familia, gestiones personales, ir al médico u hospital, entre otros. La mitad de los viajes resultan de la suma de todos los anteriores al volver al hogar ([Herce Vallejo, 2009](#)). Generalmente para estudiar el fenómeno espacial de la demanda se divide la ciudad en zonas de análisis de transporte (ZAT), las cuales poseen características socio-económicas, usos del suelo, tamaño y accesibilidad al transporte similares, con el fin de simplificar los estudios ya que hacer un análisis que tenga en cuenta cada habitante resulta robusto matemática y financieramente ([Amézquita, Durán Matiz, & Fajardo Morales, 2016](#)).

En cuarto lugar, la demanda del transporte posee elementos dinámicos muy fuertes. Algunos de estos son el volumen diferenciable a diferentes horas del día, lo que genera picos muy fuertes en horarios y lugares específicos, esto hace que el análisis de la demanda sea más difícil ([Ortúzar & Willumsen, 1994](#)).

En general existen numerosos modelos matemáticos para determinar la demanda del transporte. El modelo clásico utilizado a través de los años y que es la base de gran porcentaje de los mismos es el denominado “Modelo de cuatro etapas” propuesto por “The Chicago Area Transportation Study (CATS) (1959) ([Woldeamanuel, 1975](#)). En este se siguen cuatro etapas consecutivas que se describen a continuación.

- **Generación y atracción de viajes:** En esta etapa se registran los datos de los orígenes y destinos de los habitantes de una ciudad para conocer las dinámicas de los viajes y los diferentes modos utilizados. Este registro se realiza mediante encuestas en el hogar y de interceptación en el momento que se realizan los viajes ([Fleet & Robertson, 1968](#)).
- **Distribución de viajes:** Está etapa se enfoca en extraer los viajes realizados entre ZAT específicas, distribuyéndolos en una matriz conocida como matriz origen-destino ([Cesario, 1974](#)).
- **Partición Modal:** Luego de tener los viajes organizados en la matriz origen-destino, en esta etapa se busca distribuir los viajes según el modo de transporte utilizado para dichos viajes. En general se divide en matriz de viajes para vehículo privado y para transporte público y están fuertemente ligados a las decisiones que toman los viajeros debido a variables como la tarifa, comodidad, rapidez, etc... ([Duarte, Mendoza, Arévalo, & Guerrero, 2015](#)).
- **Asignación de viajes:** Esta etapa del modelo se encarga de asignar los viajes de las personas según el modo de transporte utilizado y teniendo en cuenta variables de la red vial como capacidad y tiempo de viaje. ([Patriksson, 1994](#); [Spiess & Florian, 1989](#))

El modelo de cuatro pasos permite modelar la demanda de una ciudad para así tomar decisiones en cuanto a la planificación del transporte. Este modelo clásico ha tenido grandes avances desde su aparición en 1956, pero su esencia permanece igual ([Agrawal, Udmale, & Sambhe, 2018](#)).

2.2.17 Modelos de Oferta

Su función principal es determinar el nivel de oferta que posee el transporte en una región dada entendiendo está como un servicio y no un bien que puede distribuirse por etapas y es consumido en el momento que es producido porque de lo contrario se pierde, por ejemplo, una vía de cuatro carriles por sentido que no trabaja a toda su capacidad no puede almacenar la capacidad que se está dejando de utilizar para el momento que el volumen vehicular la sobrepase por lo que la red vial en sí es una representación de la oferta ([Añez et al., 1996](#)). Por esto es de vital importancia predecir con la mayor precisión posible la demanda con el fin de ofertar los servicios necesarios de la manera adecuada ([Ortúzar & Willumsen, 1994](#)). En general, a nivel de oferta, las infraestructuras del transporte tienen efectos temporales, como los empleos generados al momento de la construcción, operación y mantenimiento y efectos permanentes que derivan en beneficios económicos y de productividad en las regiones de influencia. Asimismo, las infraestructuras del transporte poseen altos costos en la inversión lo que genera un alto interés en los modelos de oferta ya que permiten calcular los beneficios económicos derivados de su construcción en diferentes niveles como el urbano, regional y nacional ([Escobar, García, & Tolosa, 2013](#); [Rietveld, 1994](#)). Entre los principales modelos de oferta se encuentra la accesibilidad, la cual se aborda de manera más amplia en la siguiente sección.

2.2.18 Accesibilidad

La accesibilidad es un modelo de oferta que ha sido utilizado frecuentemente durante los últimos 70 años por los planificadores de ciudad para responder distintas situaciones que se presentan en éstas como: las dinámicas del crecimiento, usos del suelo (comercial, residencial, institucional, industrial, recreativo), expansión urbana, localización de equipamientos, infraestructura del transporte, entre otros ([Batty, 2009](#); [Ingram, 1971](#)). El primer investigador en abordar el tema, en su definición teórica y matemática, fue Hansen ([1959](#)), quién en su artículo denominado “How accessibility shapes land use” aborda el término de accesibilidad como “... the potencial of opportunities for interaction...” lo que indica que la accesibilidad se define como el potencial de oportunidades para interactuar que posee una persona o grupo de ellas en la ciudad. Además, Hansen complementa “... accessibility is a measurement of the spatial distribution of activities about a point, adjusted for the ability and the desire of people or firms to overcome spatial separation.” Esto nos indica que, junto al número de oportunidades potenciales, la accesibilidad posee otras dos variables fundamentales: la distancia hasta las oportunidades y el deseo que tengan las personas de salvar aquella distancia para interactuar con la misma. Asimismo, otros

investigadores han definido este concepto, entre otras, como la facilidad para llegar a cualquier actividad desde un lugar utilizando un modo de transporte particular ([Dalvi & Martin, 1976](#)) o como la libertad de decisión que posee un individuo para participar o no en una actividad individual ([Burns, 1980](#)) así como la utilidad generada a los habitantes por un sistema de transporte o uso del suelo particular ([Ben-Akiva & Lerman, 1979](#); [Geurs & van Wee, 2004](#)).

Ingram ([1971](#)) realizó una revisión de la literatura donde define la accesibilidad como la característica o ventaja inherente que tiene todo lugar respecto a la superación de unos operadores de impedancia, generalmente representados en la distancia o el tiempo. Además, propone una subdivisión del concepto, según la medición que se realice: accesibilidad relativa y accesibilidad integral. La accesibilidad relativa es la medida entre dos nodos ubicados en la red vial ([Bunge, 1962](#)). La accesibilidad integral es la medida del grado de conexión que tiene un nodo de la red respecto al resto de los nodos en la red vial ([Ingram, 1971](#)). Asimismo, Ingram aborda diferentes temas relacionados con las ecuaciones matemáticas utilizadas en los modelos de accesibilidad respecto a un nodo en la red. Por otra parte, el concepto de accesibilidad global también aparece y se define como el promedio de todas las accesibilidades integrales en una red vial ([Escobar & Garcia, 2012](#); [Talen & Anselin, 1998](#)), lo que permite obtener el desempeño de la misma en términos de distancia o tiempo, esta medida de accesibilidad será fundamental en el desarrollo de la tesis de investigación debido a que con este método serán probados los resultados de investigación en penalidades por giro por lo que su concepto y definición se profundizará en el siguiente apartado.

Por otro lado, Pirie ([1979](#)) analiza el concepto de accesibilidad revisando las diferentes perspectivas que los investigadores habían planteado, encontrando 7 consideraciones: las medidas de distancia (por ejemplo variantes de la accesibilidad relativa e integral planteada por Ingram) ([Baxter & Lenzi, 1975](#); [Padeiro, 2018](#)), las medidas topológicas ([Muraco, 1972](#); [Weber, 2016](#)), las medidas basadas en gravedad ([Davidson, 1977](#); [Hansen, 1959](#); [Olsson, 2016](#)), las medidas basadas en oportunidades acumuladas ([Fraser et al., 2017](#); [Wachs & Kumagai, 1973](#)), las medidas que incluyen la suposición de destino u origen y las medida que incluye la consideración de tiempo.

Luego, Geurs y Ritsema van Eck ([2001](#)) en el reporte denominado “Accessibility measures: review and applications” define la accesibilidad como “The extent to which the land-use transport system enables (groups of) individuals or goods to reach activities or destinations by means of a (combination of) transport mode(s)” lo que se puede explicar cómo el grado en que la organización de los usos del suelo permite a un individuo o grupo de personas acceder a bienes, servicios, actividades o destinos mediante el uso de diferentes modos de transporte. Además, propone cuatro diferentes componentes que se identifican en este concepto, los cuales son:

-
- El *componente del uso del suelo* el cual describe la cantidad, calidad y distribución espacial de las oportunidades de interacción (trabajos, salud, educación, recreación, comercio, etc.) y su demanda desde donde se originan los viajes y la relación entre la oferta de oportunidades y su demanda.
 - El *componente del transporte* describe el sistema de transporte expresado como la desutilidad, relación directa entre oferta y demanda, que posee un habitante para salvar una distancia entre origen y destino utilizando un modo de transporte específico. En este se incluye la cantidad de tiempo (espera, recorrido, estacionamiento, etc.), costos (tarifa en transporte público, variables en transporte privado) y las variables (confiabilidad en el viaje, comodidad, seguridad, etc.).
 - El *componente temporal* refiere las impedancias en el tiempo, es decir, la disponibilidad de oportunidades en diferentes momentos del día. Por ejemplo, la mayoría de equipamientos recreacionales poseen un horario fijo de atención.
 - El *componente individual* se refiere a las características particulares que puede tener cada habitante en una ciudad. En general se dividen en las necesidades (que dependen de la edad, género, ingreso, nivel educativo, etc.), habilidades (que dependen de la condición física y el acceso a diferentes modos de transporte) y oportunidades (dependen del ingreso económico, presupuesto para viajes, etc.).

Más adelante, Geurs y van Wee ([Geurs & van Wee, 2004](#)) complementaron el reporte hecho en 2001, describiendo las cuatro (4) diferentes perspectivas que poseen las mediciones de accesibilidad: i) La perspectiva basada en la *infraestructura*, las cuales analizan mediante observación o simulación el nivel de servicio y calidad de las infraestructuras del transporte, teniendo en cuenta el nivel de congestión y las velocidades promedio de la red vial. En planeación del transporte es utilizada frecuentemente. ii) La perspectiva basada en los *equipamientos* donde se analiza de manera global la accesibilidad a las diferentes actividades, como las universidades, hospitales, trabajos, centros de comercio, etc. Esta medida, es utilizada en temas de planificación urbana y estudios geográficos. iii) La perspectiva basada en *personas* es una accesibilidad a nivel individual como las actividades en las que puede participar una persona en un tiempo dado. Esta es limitada por los diferentes modos de transporte a los que puedan optar las personas analizadas. iv) Por último, la perspectiva basada en *utilidades* utiliza un análisis económico de los beneficios generados por las actividades. Esta medida tiene propósitos y orígenes en estudios económicos.

En los últimos años, la accesibilidad ha sido utilizada por los investigadores para responder a múltiples temas como: la planeación del transporte público ([Curtis & Scheurer, 2015](#); [Mamun, Lownes, Osleeb, & Bertolaccini, 2013](#)), sostenibilidad en la planeación de la movilidad urbana ([Kwok & Yeh, 2004](#); [Tolley, 2003](#)), medición de accesibilidad a diferentes equipamientos urbanos tales como hospitales ([Cirino, Gonçalves, Gonçalves, & Souza De Cursi, 2018](#); [Escobar et al., 2016](#)), centros comerciales ([Zuluaga & Escobar, 2017b](#)), parques públicos ([Wang, Brown, & Mateo-Babiano, 2013](#)), estaciones de bicicletas

públicas ([Cardona et al., 2017](#)), entre otros. Además, se han realizado investigaciones relacionadas con la equidad en el transporte ([Lucas, van Wee, & Maat, 2016](#)), relacionándolo con el transporte público ([Bocarejo & Oviedo, 2012](#); [Guzman & Oviedo, 2018](#); [Guzman, Oviedo, & Rivera, 2017](#)). Por otro lado, la accesibilidad como herramienta para evaluar los beneficios de nuevas obras de infraestructura ([Moncada et al., 2018](#); [Perilla et al., 2018](#)).

Por lo tanto, la accesibilidad ha sido una herramienta de planeación muy poderosa, utilizada frecuentemente por los planeadores urbanos para describir diferentes situaciones de la movilidad en una ciudad la cual tiene avances y nuevas aplicaciones año tras año ([van Wee, 2016](#)). En el siguiente ítem se aborda la accesibilidad media global, medida utilizada en esta investigación para calcular las diferencias entre los diferentes escenarios, dadas las diferentes penalidades por giro calculadas.

2.2.19 Accesibilidad Media Global

La accesibilidad media global es una medida de accesibilidad que calcula la relación en tiempo o distancia entre todos los nodos de la red vial ([Talen & Anselin, 1998](#)). En esta, se utiliza la teoría de grafos para la construcción de la red vial ([Seguí & Petrus, 1991](#)) y el algoritmo de caminos mínimos de Dijkstra optimizado, donde se minimiza una variable como tiempo o distancia, para obtener la matriz de viajes ([Delling et al., 2009](#); [Dijkstra, 1959](#); [Wu et al., 2015](#)). La accesibilidad media global se encuentra enmarcada en la primera perspectiva de análisis de Geurs y van Wee ([2004](#)), basada en infraestructura, debido a que utiliza la red vial junto con las velocidades promedio de la ([Escobar & Garcia, 2012](#)) y las penalidades por giro ([Micó & Soler, 2011](#); [Yiannakoulis et al., 2013](#)) para realizar el análisis.

La accesibilidad media global ha sido utilizada en diversas investigaciones en la región Andina ([Loaiza, Holquín, & Escobar, 2016](#); [Zuluaga & Escobar, 2017a](#)) y la ciudad de Manizales en temas relacionados con transporte público tipo cable aéreo ([Escobar & Garcia, 2011](#)), equipamientos urbanos como hospitales ([Escobar et al., 2016](#)), centros comerciales ([Zuluaga & Escobar, 2017b](#)), entre otros, por lo que su uso ha sido frecuente en la ciudad de estudio dándole relevancia a la investigación dadas sus numerosas aplicaciones en el medio. A continuación, se describen algunos conceptos importantes a la hora de realizar el cálculo de la accesibilidad media global, la cual será descrita en el apartado de metodología de investigación.

2.2.20 Red Vial

Para el cálculo de la accesibilidad media global y en general para el cálculo de cualquier método de accesibilidad o modelo transporte es indispensable la construcción de la red vial ([Ortúzar & Willumsen, 1994](#); [Winter, 2002](#)). Esta ha sido de gran importancia para los geógrafos debido a que los empinamientos y redes ocupan un lugar en el espacio y constituyen un sistema espacial complejo ([Rodríguez, Comtois, & Slack, 2016](#)). Para su

constitución, se deben seguir unas reglas según la teoría de grafos, la cual supone la construcción de la red vial según arcos (l_i) (vías) y nodos (n_i) (intersecciones viales) ([Bunge, 1962](#); [Cardozo, Gómez, & Parras, 2009](#)). Por otro lado, la red vial constituida debe poseer diversas características que permitirán el posterior cálculo de accesibilidad. En primer lugar, la longitud de los arcos, la cual se obtiene mediante las herramientas de software SIG. En segunda instancia, las velocidades de operación de los arcos (v_i), se puede utilizar la velocidad operativa de la red vial según la jerarquización vial ([Zuluaga & Escobar, 2017a](#)), obtener mediante análisis de velocidad en campo o GPS, cómo en estudios previos realizados en la ciudad ([Escobar & Garcia, 2012](#)). Por último, se calcula el tiempo de viaje correspondiente a cada arco (t_i) ([Ecuación 6](#)).

$$t_i = \frac{l_i}{v_i} \quad (6)$$

2.2.21 Algoritmo de Dijkstra

El algoritmo de caminos mínimos de Dijkstra fue planteado por este investigador en el año 1959 en su artículo denominado “A Note on Two Problems in Connexion With Graphs” donde se considera una red de nodos unida por arcos, con la longitud entre estos dada. Este algoritmo considera dos problemas: i) Debe existir como mínimo un camino o ruta entre los diferentes nodos que conforman la red y ii) Se encuentra el camino mínimo entre dos nodos dados P y Q, minimizando la longitud, donde se presenta el hecho de que si existe un nodo intermedio R en la ruta entre P y Q, la ruta entre P y R dada será la mínima, por lo que para encontrar la ruta mínima entre P y Q, se debe encontrar todas las rutas mínimas entre P y los diferentes nodos intermedios entre P y Q ([Dijkstra, 1959](#)).

Asimismo, en 1987 la acumulación de Fibonacci fue utilizada por los investigadores Fredman y Tarjan con el fin de optimizar el funcionamiento del algoritmo de Dijkstra ([Fredman & Tarjan, 1987](#)). Más adelante, se investigaron las aplicaciones más eficientes del algoritmo de Dijkstra a través de una nueva estructura de datos denominado “*radix heap*” ([Ahuja, Mehlhorn, Orlin, & Tarjan, 1990](#)) y se realizaron diversas evaluaciones teóricas y experimentales del algoritmo ([Cherkassky, Goldberg, & Radzik, 1996](#)). Por otra parte, se realizaron mejoras sustanciales al algoritmo, mejorando su funcionamiento en redes de gran tamaño como las redes de transporte ([Wu et al., 2015](#)), analizando sus diversas aplicaciones ([Mozes, Nussbaum, & Weimann, 2017](#)). En el campo de la modelación del transporte ha sido utilizado frecuentemente para el cálculo de caminos mínimos ([Delling et al., 2009](#); [Gohari et al., 2018](#); [Sanders & Schultes, 2007](#)) y más específicamente en la accesibilidad media global para calcular la matriz de tiempos de viaje M_{tv} y el vector de tiempos promedio de viaje de los nodos \bar{T}_v ([Mavoa, Witten, McCreanor, & O'Sullivan, 2012](#); [Moncada et al., 2018](#); [Perilla et al., 2018](#)). Además, diversas investigaciones han optimizado dicho algoritmo con el fin de incluir las penalidades y restricciones por giro en la red vial ([Añez et al., 1996](#); [Caldwell, 1961](#); [Winter, 2002](#)).

2.2.22 Matriz de Tiempos de Viaje y Vector de Tiempos Promedio de Viaje

Para el cálculo de la accesibilidad media global se debe obtener el vector de tiempos promedio de viaje (\overline{Tv}) (tamaño nx1). Para ello, es preciso contar con la matriz de tiempos de viaje (M_{tv}), la cual es calculada mediante el algoritmo de Dijkstra, dando como resultado una matriz (tamaño nxn) donde se registran todos los caminos mínimos entre cada nodo i y j ([Zuluaga & Escobar, 2017a](#)). El análisis de accesibilidad media global puede tomar dos enfoques. El primero es el análisis desde el origen, donde el vector de tiempos promedio de viaje se calcula tomando los nodos como origen del viaje (\overline{Tv}_i) ([Ecuación 7](#)). El segundo es el análisis como destinos, donde el vector de tiempos promedio de viaje se calcula tomando los nodos como destino de los viajes \overline{Tv}_j ([Ecuación 8](#)) ([Moncada et al., 2018](#); [Perilla et al., 2018](#)).

$$\overline{Tv}_i = \frac{\sum_{j=1}^n tv_{ij}}{n-1} \quad (7)$$

$$\overline{Tv}_j = \frac{\sum_{i=1}^n tv_{ji}}{n-1} \quad (8)$$

En esta investigación, se abordará el enfoque de la accesibilidad media global desde el origen en los diferentes escenarios de análisis.

2.2.23 Gradiente de Ahorro

En esta investigación se realizará la comparación de diferentes escenarios mediante el cálculo del gradiente de ahorro, el cual realiza un cálculo entre los vectores de tiempo promedio de viaje ([Ecuación 9](#)) obteniendo el porcentaje de diferencia entre los escenarios estudiados. Este método ha sido utilizado en distintas investigaciones para encontrar el ahorro generado por nuevas obras de infraestructura vial ([Moncada et al., 2018](#); [Perilla et al., 2018](#)) e incluso la inclusión de nuevos equipamientos urbanos ([Zuluaga et al., 2018](#)).

$$SG(\%) = \frac{\overline{Tvb} - \overline{Tva}}{\overline{Tvb}} * 100 \quad (9)$$

En esta ecuación \overline{Tvb} corresponde al escenario base y \overline{Tva} al escenario comparativo.

2.2.24 Modelo Geo estadístico

Para la obtención de las curvas isócronas de accesibilidad media global los investigadores han utilizado frecuentemente el modelo geo estadístico Kriging Ordinario ([Perilla et al., 2018](#); [Prasetyowati, Imrona, Ummah, & Sibaroni, 2016](#)). Los modelos ge estadísticos se

preocupan por la distribución en el espacio de valores útiles, estos fueron planteados a mediados del siglo pasado por Matheron (1963) utilizando en áreas del conocimiento como la geología y minería, más adelante Díaz Viera (2002) la definió como el “análisis y predicción de fenómenos en el espacio y/o tiempo” y su campo de acción y validez se amplió profundamente (Samper & Carrera, 1990).

Uno de las columnas vertebrales del análisis geo estadístico es la “determinación de la estructura de auto correlación entre los datos y su uso en la predicción a través de las técnicas conocidas como Kriging y Co-Kriging”, afirma Giraldo (2002). El análisis estructural se encarga de construir, estimar y modelar una función que refleje la correlación espacial de los datos, por lo que el semi variograma ($\tilde{\gamma}(h)$) (Ecuación 10) es la herramienta central de la geo estadística (Díaz Viera, 2002). Para nuestro caso, se utilizará el semi variograma lineal como método de correlación (Loaiza et al., 2016; Perilla et al., 2018).

$$\overline{\tilde{\gamma}(h)} = \frac{\sum(Z_{(x+h)} - Z_{(x)})^2}{2n} \quad (10)$$

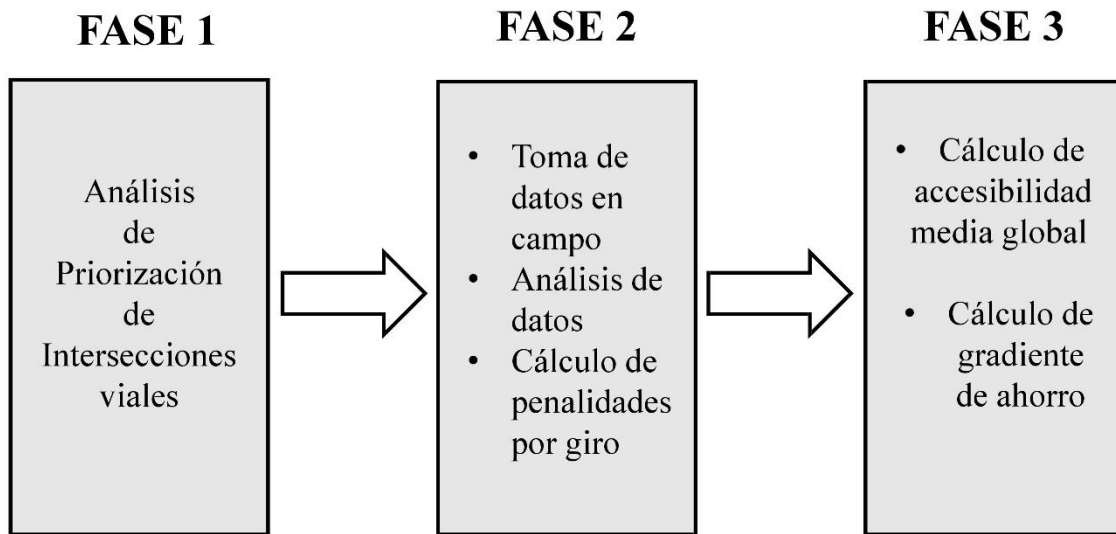
Para la interpolación espacial, se utiliza el método Kriging ordinario el cual posee un conjunto de métodos predictivos que minimizan el error cuadrático medio de la predicción. El Kriging ordinario propone que el valor de la variable se puede predecir mediante la combinación lineal de las n variables aleatorias (Giraldo, 2002) (Ecuación 11). Los pesos de las ponderaciones son representados por λ_i .

$$Z_{(x_0)} = \lambda_1 Z_{(x_1)} + \lambda_2 Z_{(x_2)} + \lambda_3 Z_{(x_3)} + \lambda_4 Z_{(x_4)} + \dots + \lambda_n Z_{(x_n)} = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{(x_i)} \quad (11)$$

3. Metodología

En la [figura 13](#) se observa la metodología general de investigación compuesta por 3 fases consecutivas, las que serán abordadas y descritas de forma más específica en los siguientes ítems.

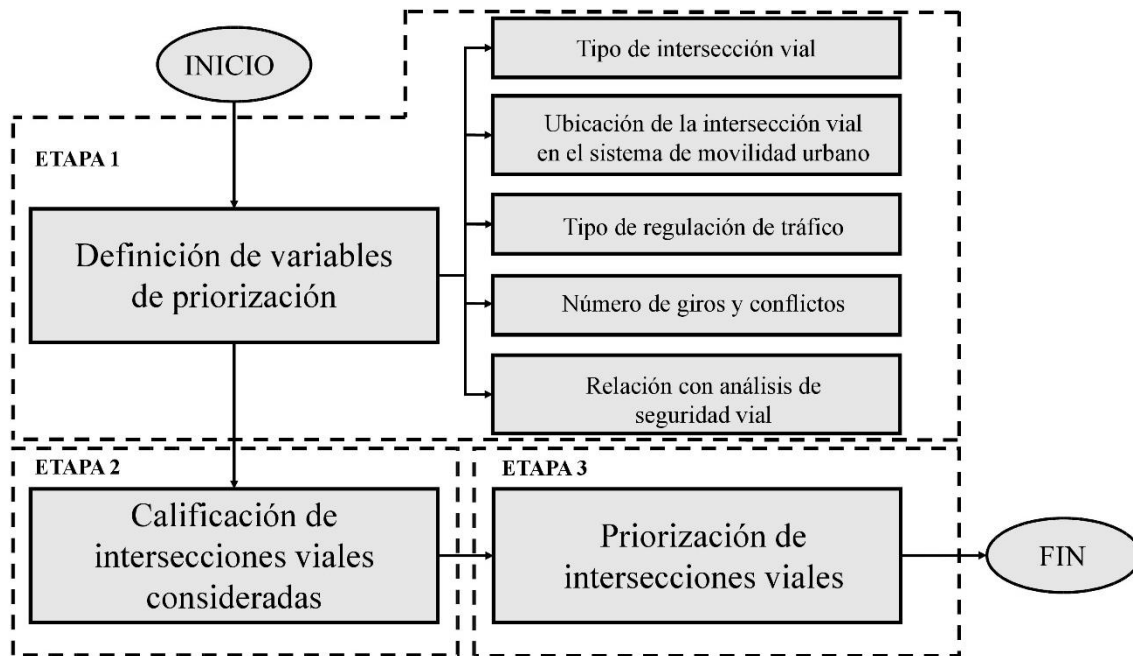
Figura 13 Metodología general de investigación.



Fuente: Elaboración Propia.

3.1 Análisis de priorización de Intersecciones Viales

En esta fase de la investigación se realiza un análisis de priorización el cual consta de 3 etapas consecutivas: i) definición de variables de priorización, ii) calificación de intersecciones viales consideradas y iii) la priorización final de intersecciones viales, que nos permitirá obtener las intersecciones viales que serán objeto de análisis en la fase 2 de la investigación.

Figura 14 Fase 1. Análisis de priorización de intersecciones viales.

Fuente: Elaboración Propia.

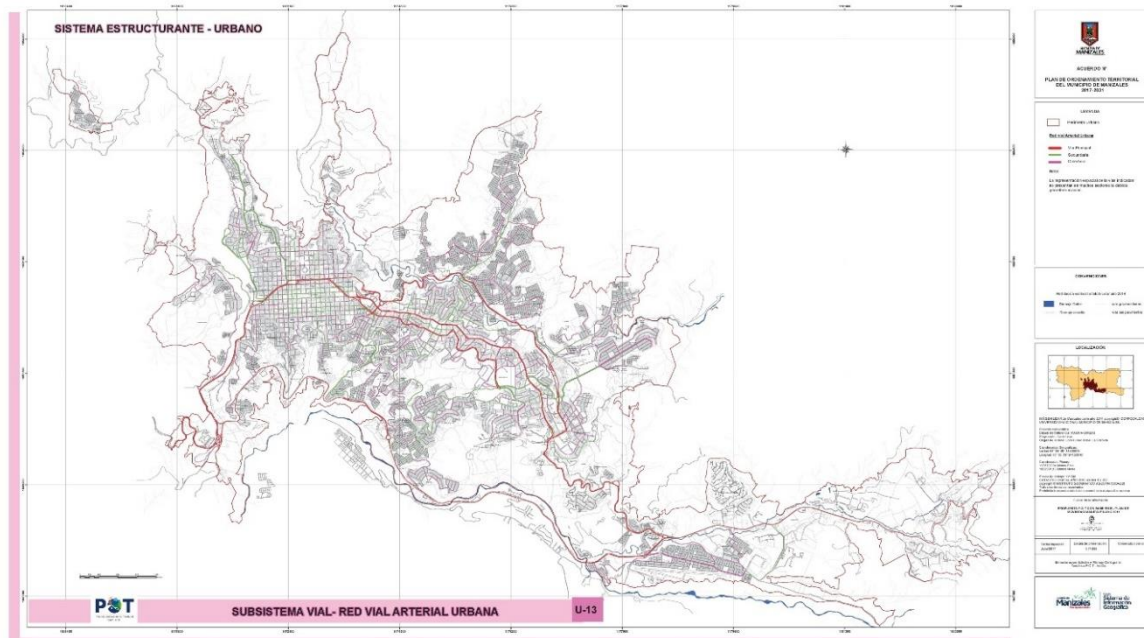
3.1.1 Definición de variables de priorización:

En este apartado se describen las diferentes variables que serán tenidas en cuenta a la hora de priorizar las intersecciones viales. Cada variable tendrá una calificación máxima de 10 puntos, lo que significa que la variable hace más propensa al análisis la intersección. Para este caso se tuvieron en cuenta 5 variables por lo que la calificación máxima que podrá obtener cada intersección será 50 puntos.

- Tipo de intersección vial:** En primer lugar, se tendrá en cuenta el tipo de intersección según el tipo de canalización de tráfico descrito en la [sección 2.2.3](#). En este caso, las intersecciones viales simples tendrán una calificación de 10 puntos debido a que no poseen canalización de tráfico por lo que los vehículos comparten el mismo flujo y son más propensos a demoras por congestión. Las intersecciones viales con canalización de tráfico por señalización horizontal y/o vertical poseen una calificación de 8 puntos debido a que dicha canalización disminuye las demoras y ayuda a la organización del flujo, pero al no ser rígida los diferentes actores viales pueden pasarla por alto y generar congestión. Por último, las intersecciones viales con canalización mediante infraestructura poseen una separación del tráfico rígida por lo que tendrán una calificación de 7 puntos ya que son menos propensas a demoras por congestión y la canalización hace que el flujo sea directo.

- Ubicación de la intersección vial en el sistema de movilidad urbano:** En segundo lugar, se tiene en cuenta la ubicación de las intersecciones viales en el sistema de movilidad urbano de la ciudad de estudio, en este caso Manizales, por lo que se utiliza la clasificación realizada en el componente urbano del Plan de Ordenamiento Territorial de Manizales 2017 – 2032 ([ver figura 15](#)) y las clasificaciones adoptada en las secciones [2.2.8](#), [2.2.9](#), [2.2.10](#), [2.2.11](#) y [2.2.12](#). Así, las intersecciones viales ubicadas sobre las vías arterias principales obtienen una calificación de 10 puntos debido a que el volumen vehicular es presumiblemente mayor, sobre vías arterias secundarias un puntaje de 8 puntos, sobre vías colectoras 7 puntos y finalmente aquellas ubicadas sobre vías locales un puntaje de 5 puntos. Esto hace más propensas a análisis las intersecciones ubicadas sobre vías con mayor flujo vehicular debido a que esto enriquecerá el análisis posterior de toma de tiempos de giro. Por lo tanto, para la ubicación se las intersecciones viales en el sistema de movilidad se utilizará la imagen 15, la cual fue extraída del POT de Manizales 2017-2032 como el mapa U-13 “Subsistema vial- Red Arterial Urbana” y posee la clasificación de vías arterias principales, secundarias y colectoras de la ciudad de Manizales, determinando como locales aquellas que no se encuentran clasificadas en dicha imagen, exceptuando aquellas que poseen clasificación como vías de margen paisajístico, peatonales o semi-peatonales ([Alcaldía de Manizales, 2017b](#)).

Figura 15 Mapa U-13 “Subsistema vial- Red Arterial Urbana”.



Fuente: Plan de Ordenamiento Territorial Manizales 2017-2031.

- Tipo de regulación de tráfico:** En esta variable se tiene en cuenta la clasificación de regulación de tráfico para intersecciones viales descrita en la [sección 2.2.4](#). Por

lo que para intersecciones viales semaforizadas se tendrá una puntuación de 10 puntos debido a las demoras ocasionadas por las fases de cada semáforo, mientras que las intersecciones viales reguladas por señalización tipo PARE o CEDA EL PASO tendrán una calificación de 5 puntos.

- **Número de giros y conflictos:** En esta variable se cuantifica el número de giros a analizar en cada intersección vial según las secciones [2.2.6](#) y [2.2.7](#). Así, los giros a la izquierda que posean conflicto con tráfico directo suman 5 puntos a la variable, mientras que el giro a la izquierda y giro a la derecha simple suma 3 puntos a la variable. Finalmente se suma la calificación de todos los giros siendo 10 el máximo que se puede registrar para esta variable, lo que nos indica que existen mayor número de giros, lo que la hace más prioritaria para el análisis.
- **Relación con análisis de seguridad vial:** Las intersecciones viales que posean relación con análisis de accidentalidad vial tendrán una mayor calificación, alcanzando 10 puntos, mientras que los que no se encuentren dentro de estos análisis tendrán 5 puntos. En la ciudad de Manizales se han llevado a cabo la Fase I y II de auditorías en seguridad vial en corredores e intersecciones viales de alta accidentalidad con apoyo de la Alcaldía de Manizales, la Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV) y la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales ([Alcaldía de Manizales, 2016](#), [2017a](#)). Estas auditorías buscan realizar un análisis de seguridad vial con el fin de mitigar el riesgo de los actores viales de sufrir accidentes de tránsito mediante diferentes acciones como educación vial, mejora de la señalización horizontal y vertical, puesta en marcha de acciones como reductores de velocidad, cámaras de velocidad, entre otros.

3.1.2 Calificación de Intersecciones Viales

En esta segunda etapa de la fase 1 de la metodología de investigación se deben clasificar cada una de las intersecciones viales consideradas según las variables descritas en el apartado anterior, asignándole el puntaje correspondiente y obteniendo un puntaje final para cada intersección vial.

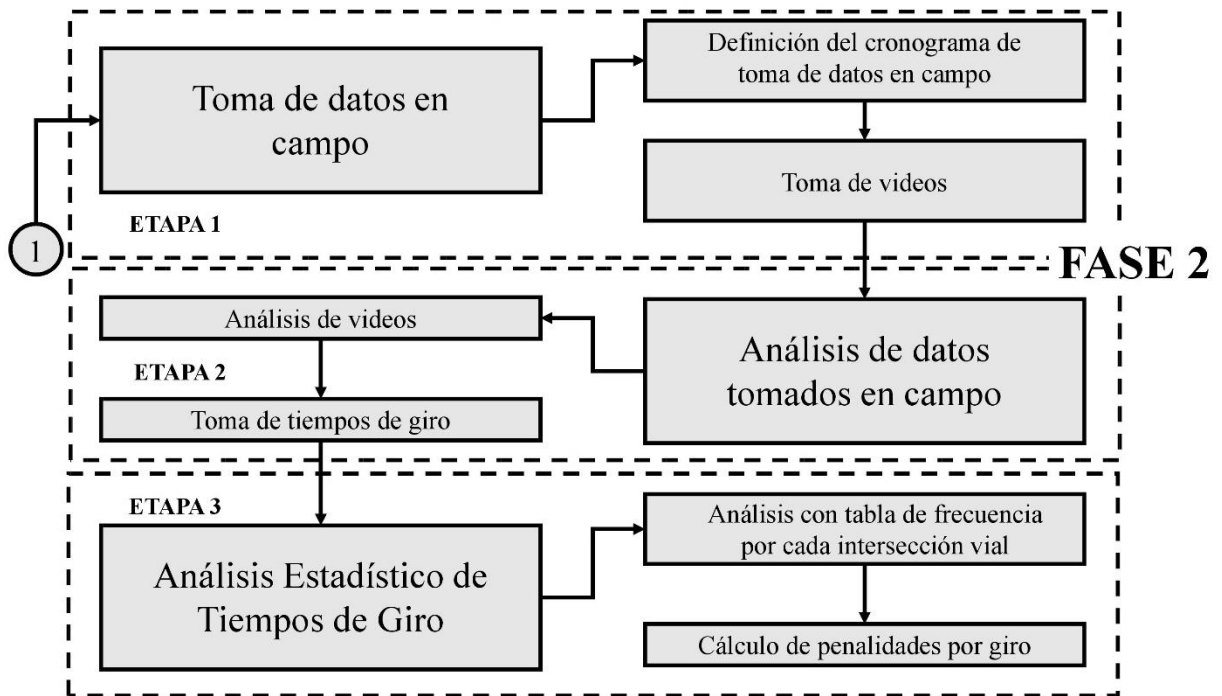
3.1.3 Priorización de Intersecciones Viales

En esta etapa se toma el puntaje obtenido en el apartado anterior de calificación de intersecciones viales y se ordena de mayor a menor escogiendo las intersecciones viales para el análisis aquellas que poseen mayor puntaje de prioridad.

3.2 Toma y análisis de datos

En esta fase de la investigación ([Figura 16](#)) se realiza trabajo de campo en las intersecciones viales priorizadas para el análisis en la fase 1, a continuación, se describen las diferentes etapas que posee esta fase de la investigación.

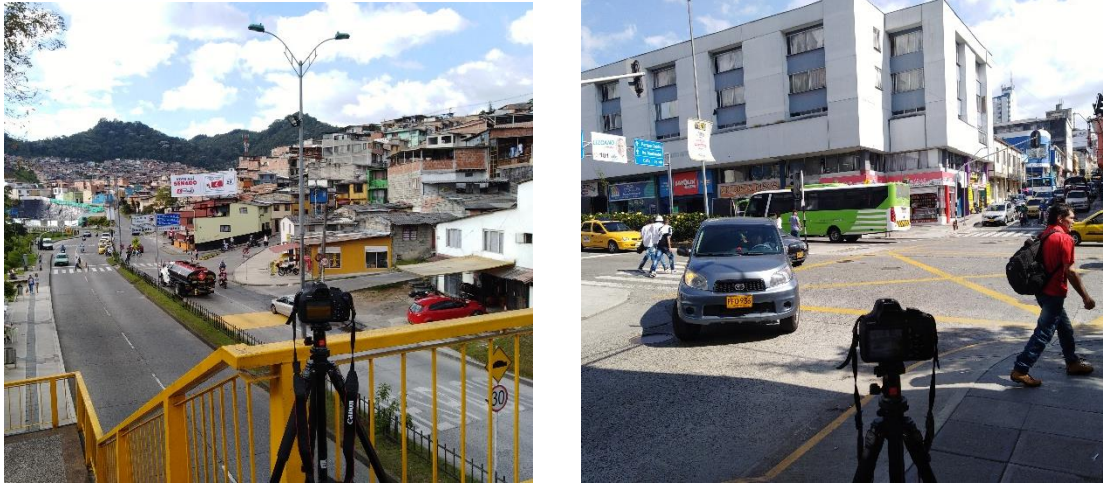
Figura 16 Fase 2. Toma de datos en campo, análisis de datos y cálculos de penalidades por giro.



Fuente: Elaboración Propia.

3.2.1 Toma de datos en campo

Para la toma de datos en campo se deben tener en cuenta las intersecciones viales que resultan del análisis de priorización hecho en la fase 1 de la investigación ([ver sección 3.1](#)). En esta etapa se debe *definir el cronograma de toma de datos en campo* debido a que se deben cumplir ciertas características especiales, tales que las fechas se encuentren dentro de periodos típicos de tráfico en el año con el fin de conservar una uniformidad en el tránsito de la ciudad, alejándose de periodos atípicos para la movilidad como las vacaciones educativas a final y mitad de año, semana santa, entre otras fechas. Teniendo definido el cronograma de toma de datos en campo, se procede a la *toma de videos* ([ver figura 17](#)) en cada intersección vial seleccionada, el cual debe ser realizado con una cámara de video que permita mínimo una resolución 480p. Finalmente, los videos se toman entre 45 y 60 minutos, en ángulo fijo, el cual permita tomar una perspectiva amplia de la intersección vial y donde se observen la mayor cantidad de movimientos posibles.

Figura 17 Toma de videos en intersecciones viales.

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.2 Análisis de datos tomados en campo

Para esta etapa de la fase 2 se debe contar con computador de mesa o portátil, que permita reproducir los diferentes videos tomados en la etapa anterior. Para cada intersección vial, se analiza el video registrado en el trabajo de campo de manera que se estudian los diferentes movimientos de giro que se pueden observar en su totalidad, la cual se refiere a que se puede registrar el movimiento del vehículo, desde que ingresa a la intersección y comienza el giro, hasta que lo termina. En cada movimiento se registra el tiempo de giro, en segundos, que le toma a cada vehículo (Carro, Camión/Bus y Motocicleta) para realizar el movimiento en su totalidad y se registra en una tabla como se muestra en la [tabla 1](#). Es en esta etapa de la investigación que los videos cobran un valor agregado respecto a la toma de tiempos en campo debido a que el video puede revisarse en varias ocasiones para comprobar el tiempo real, además permite registrar un número mayor de vehículos en menor tiempo.

Tabla 1 Formato para registro de tiempos de giro en intersecciones viales.

Movimiento X		
Carro	Camión/bus	Motocicleta

Fuente: Elaboración Propia.

En la [figura 18a](#) se puede observar un vehículo cuando entra a la intersección vial analizada, donde se dispone a realizar el giro a la izquierda, es en este instante donde se comienza a tomar el tiempo. En la [figura 18b](#) se observa cuando el vehículo finaliza el giro por lo que en este instante se debe detener la toma de tiempo.

Figura 18 Instante de inicio (a) y fin (b) de toma de tiempo en intersección vial, cuando no existe cola de espera.



Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado, si la intersección posee cola de vehículos, por tiempo de espera debido a semáforo o congestión, el tiempo se toma desde que el vehículo ingresa a la cola de espera, como se observa en la [figura 19a](#). En la [figura 19b](#) se observa cuando el vehículo finaliza el movimiento, instante que se debe parar la toma de tiempo.

Figura 19 Instante de inicio (a) y fin (b) de toma de tiempo en intersección vial, cuando existe cola de espera



Fuente: Elaboración Propia

3.2.3 Análisis Estadístico de Tiempos de Giro

En esta etapa se utilizan los métodos estadísticos para la ingeniería de tránsito, descritos en la [sección 2.2.13](#), los cuales sirven para organizar los datos tomados de los videos en

tablas de frecuencia. Posteriormente se obtienen las medidas de tendencia central como la media aritmética y la desviación estándar, cálculos fundamentales para el cálculo de las penalidades por giro en esta investigación. Para la elección del número de intervalos se usa la [ecuación 3](#) para luego continuar calculando las diferentes medidas, tal cual se muestra en la [tabla 2](#), muestra del modelo utilizado para cada movimiento analizado en cada intersección vial y para el análisis final por giros realizado.

Tabla 2 Tabla de frecuencia para análisis estadístico de tiempos de giro.

Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1							
2							
3							
.							
.							
.							
n							
			Total				

Fuente: Elaboración Propia.

En la [tabla 2](#) se pueden observar las siguientes variables, marca de clase (Ti) la cual es el promedio entre el límite inferior y superior de cada intervalo, la frecuencia absoluta (FI) que es el número de tiempos que se encuentran entre los límites del intervalo, la frecuencia absoluta acumulada (FIA) la cual acumula las diferentes frecuencias absolutas de los intervalos hasta llegar al total de datos, la frecuencia relativa (FR) y la frecuencia relativa acumulada (FRA) que son el porcentaje de los tiempos observados en la FI y FIA respectivamente.

Por lo tanto, cada movimiento de las intersecciones se resume en estas tablas de frecuencia lo que permite obtener la media aritmética lo que fundamentalmente representa el tiempo de giro promedio en cada intersección, el cual será utilizado en cálculos posteriores de la metodología.

3.2.4 Cálculo de Penalidades por Giro

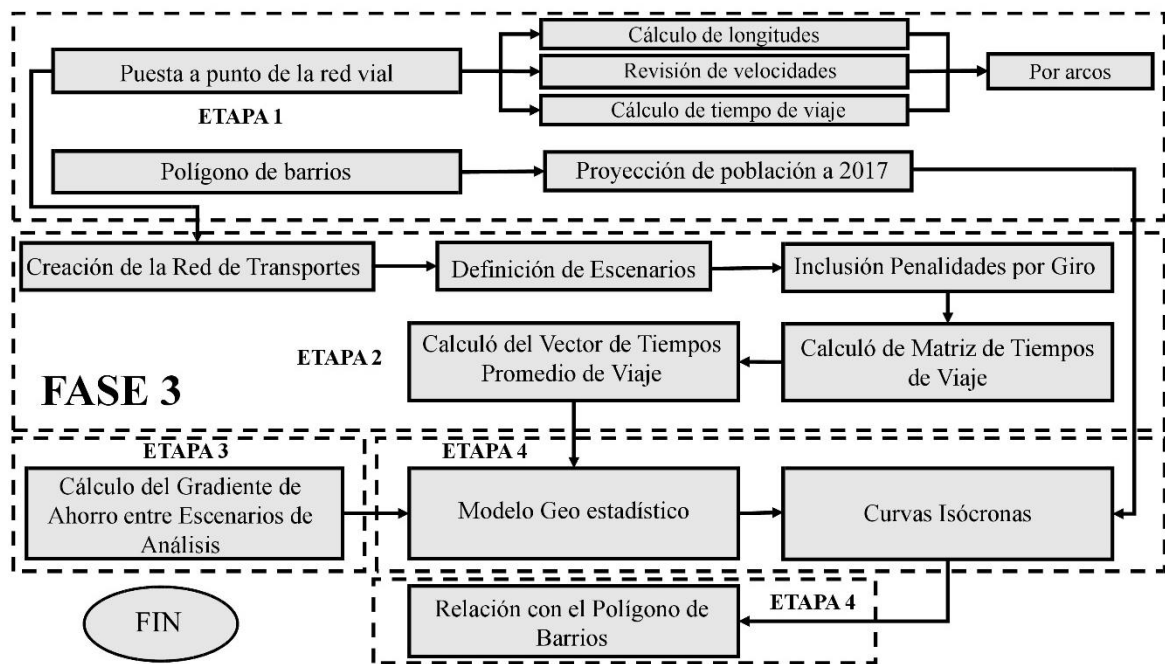
Se puede decir que un primer cálculo de penalidades por giro es aquel donde se toma el conjunto de los tiempos tomados de los movimientos a la izquierda y la derecha para así realizar el análisis mediante tablas de frecuencia, tomando el promedio de cada giro como las penalidades por giro. Otro método es tomar el análisis realizado por cada movimiento, discriminando los movimientos a izquierda y derecha realizando el promedio de los resultados de cada tabla de frecuencia. Para el cálculo de las penalidades por giro se utilizarán diversos métodos que serán explicados a mayor profundidad al momento de

presentar los resultados debido a que serán utilizados para correr el modelo de oferta para así escoger el que mejor represente la realidad de la movilidad en la ciudad de estudio.

3.3 Cálculo de Accesibilidad Media Global y Gradiente de Ahorro

En esta fase de la investigación (Figura 20) se busca realizar el cálculo de la accesibilidad media global para diferentes escenarios, con distintas penalidades por giro, entre los cuales se toma de base comparativo el realizado con las penalidades determinadas de forma subjetiva contra los escenarios calculados desde el método científico descrito en las fases anteriores de esta investigación. Dicha comparación se realizará a través del gradiente de ahorro, el cual permite cuantificar las diferencias, en porcentaje, entre los vectores de tiempo promedio de viaje. A continuación, se describirán con mayor detalle las etapas llevadas a cabo en esta fase.

Figura 20 Fase 3. Cálculo de accesibilidad media global y gradiente de ahorro



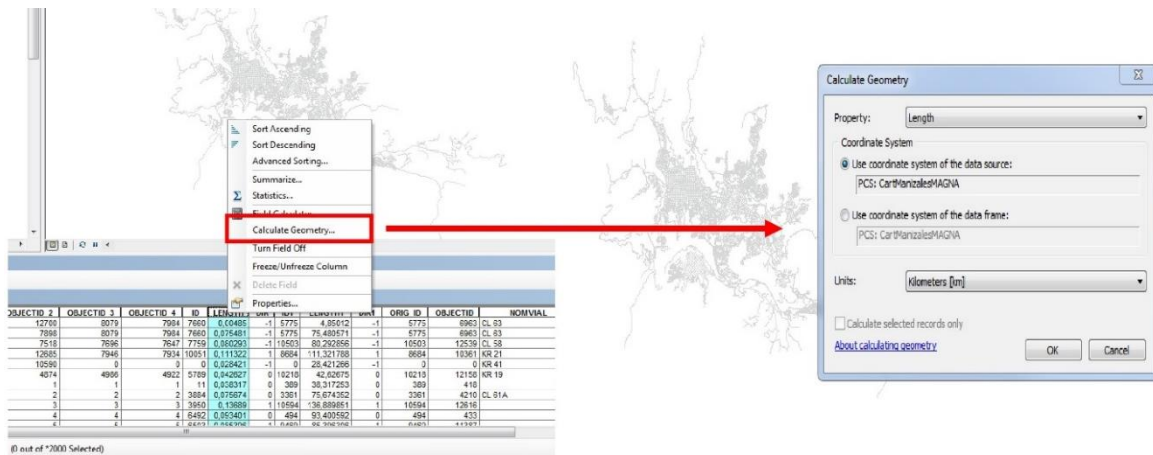
Fuente: Elaboración Propia.

3.3.1 Puesta a punto de la red vial y el polígono de barrios

En primer lugar se obtiene la red vial de la zona de estudio gracias a investigaciones llevadas a cabo en la zona de estudio por la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales en las cuales se construyó la red vial y se calcularon las velocidades de cada arco por medio de dispositivos GPS (Alcaldía de Manizales, 2017c; Escobar & Garcia,

2012; [Moncada et al., 2018](#); [Perilla et al., 2018](#); [Younes et al., 2016](#)). Por otra parte, se deben calcular las longitudes de cada arco por medio de la herramienta “*Calculate Geometry*” del software SIG ArcGIS 10.4.1 ([Figura 21](#)). Luego de tener la velocidad y longitud de cada arco, se procede a calcular el tiempo de viaje por arco según la [ecuación 6](#).

Figura 21 Calcular geometría en ArcGis.

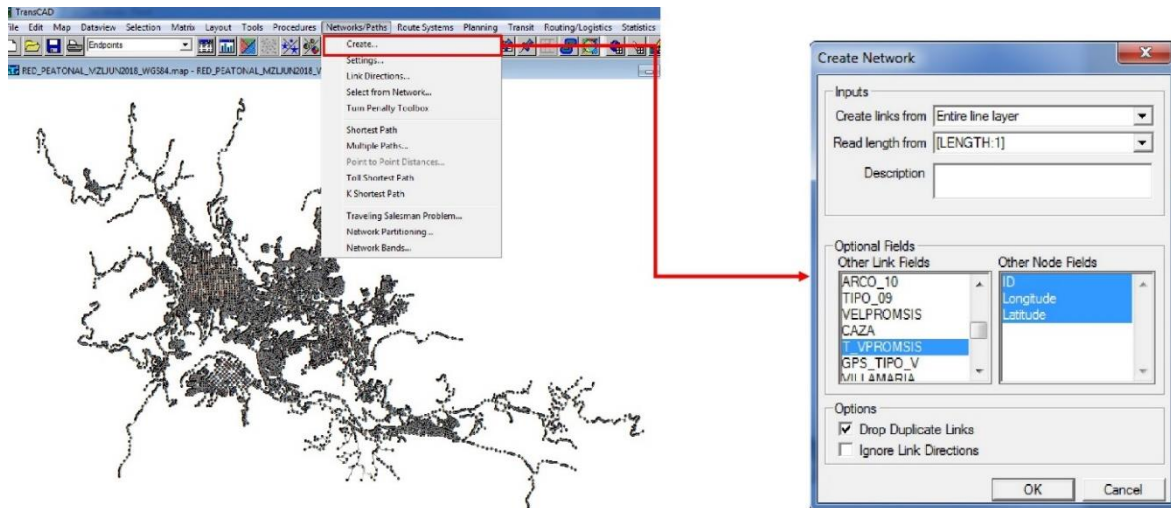


Fuente: Elaboración Propia.

En segundo lugar, se debe proyectar la población del polígono de barrios, el cual fue construido para la elaboración del Plan Maestro de Movilidad 2011, junto con la población presente para dicho año y actualizada para el 2015, por lo que es indispensable proyectar la población presente en dicho polígono al año 2017 mediante las tasas de crecimiento determinadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE según el censo general de 2005 ([DANE, 2010](#)).

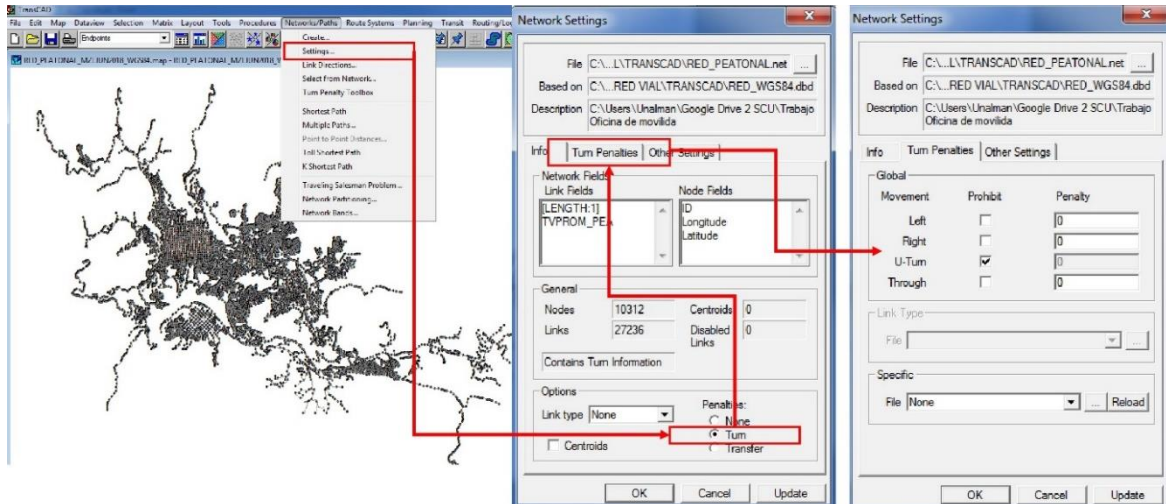
3.3.2 Cálculo de Accesibilidad Media Global

En esta etapa se utiliza la red vial construida en el software ArcGis para calcular la matriz de tiempos de viaje en el software TRANSCAD 7.0 el cual es un software SIG que posee un paquete especializado para el cálculo de modelos de transporte. En primer lugar se debe crear la red de transportes ([Figura 22](#)), la cual es una entidad que reconoce TRANSCAD para los cálculos de la matriz de tiempos y que contiene los atributos necesarios tales como longitud, velocidad y tiempos de viaje por cada arco.

Figura 22 Creación de la red de transportes en TRANSCAD.

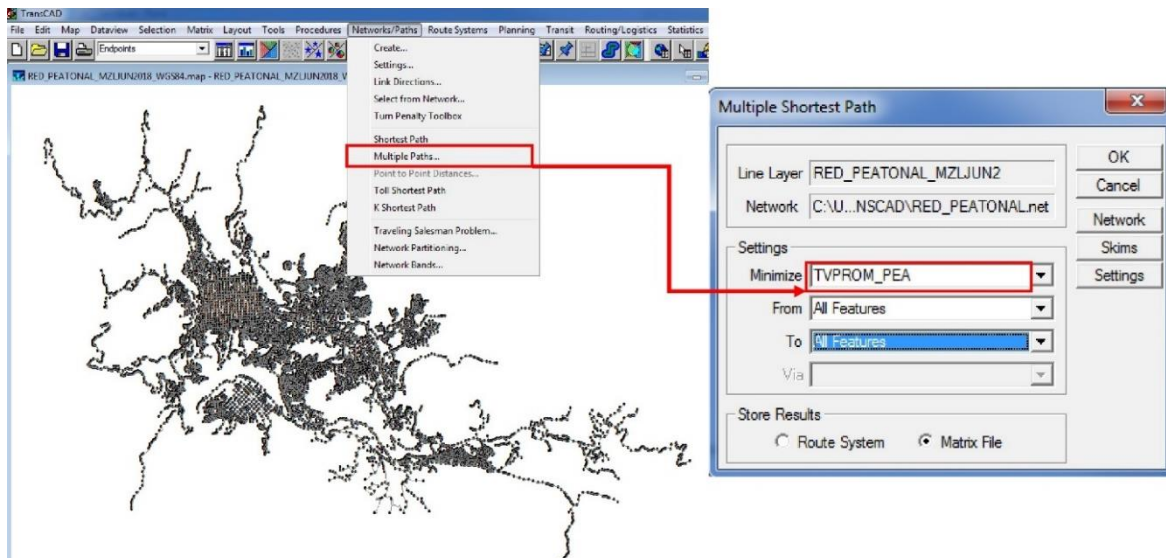
Fuente: Elaboración Propia.

En segundo lugar, se incluyen las penalidades por giro (ver [Figura 23](#)) en la opción *Settings/Configuración* de la red de transportes, donde se debe habilitar la opción *turn/giro* la cual corresponde a las penalidades por giro globales en el sistema, los cuales son incluidos en la pestaña *Turn Penalties/Penalidades por giro*. En esta última pestaña se tiene la opción de incluir el tiempo, según las unidades que posea el atributo de tiempo de viaje de la red, que se penalizará, es decir que sumará, por cada giro a la izquierda (*Left*) o derecha (*Right*) que se presente en el algoritmo de caminos mínimos. Es en este cuadro de dialogo donde se incluyen los diferentes escenarios que serán analizados (penalidades subjetivas como escenario base y penalidades calculadas en la fase 2 como escenarios alternativos) mediante el gradiente de ahorro en las etapas posteriores. Cabe destacar que no se incluirá ninguna penalidad cuando el modelo siga en dirección recta (*Through*) y que el giro en U queda restringido en el modelo (*U-Turn*).

Figura 23 Ingreso de las penalidades por giro globales en TRANSCAD.

Fuente: Elaboración Propia.

En tercer lugar, se calcula la matriz de tiempos de viaje entre todos los nodos de la red vial mediante la herramienta *multiple paths* de TRANSCAD (ver [figura 24](#)) la cual minimiza el tiempo de viaje entre los nodos, teniendo en cuenta las penalidades por giro. Por ello es importante incluir la variable “tiempo de viaje” al momento de crear la red de transportes y tener en cuenta al momento de operar está ultima herramienta que se estén analizando los caminos mínimos entre todos los nodos de la red de transportes, lo es fundamental para la accesibilidad media global.

Figura 24 Cálculo de la matriz de tiempos de viaje en TRANSCAD.

Fuente: Elaboración Propia.

Por último, se debe calcular el vector de tiempos promedio de viaje por cada escenario de análisis mediante las [ecuaciones \(7 u 8\)](#). Este vector servirá para las dos siguientes etapas, el cálculo del gradiente de ahorro para realizar la comparación y para la construcción de las curvas isócronas de accesibilidad mediante el modelo geo estadístico.

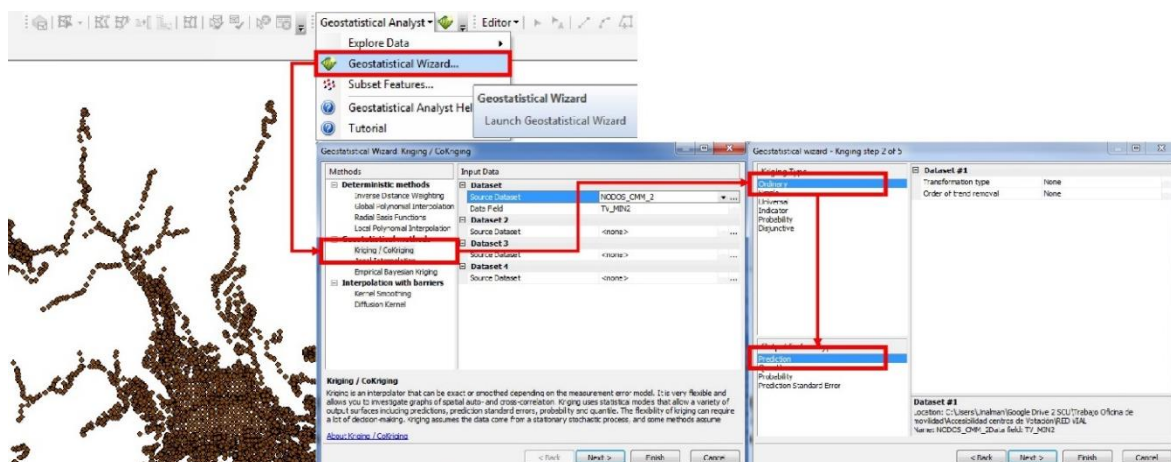
3.3.3 Cálculo del Gradiente de Ahorro

En esta etapa se realiza la comparación de los diferentes escenarios de análisis mediante el gradiente de ahorro (ver [ecuación 9](#)), obteniéndose un vector con el porcentaje de diferencia presentada, los cuales sirven para construir las curvas isócronas de ahorro de tiempo en la siguiente etapa.

3.3.4 Modelo Geo Estadístico, Construcción de Curvas Isócronas y relación con el Polígono de Barrios

Para la obtención de las curvas isócronas de accesibilidad y gradiente de ahorro es necesario aplicar el modelo geo estadístico Kriging Ordinario descrito en la [sección 2.2.24](#). Para ello, se debe incluir el vector de tiempos promedio de viaje o de gradiente de ahorro en el software ArcGis 10.4.1 el cual posee diversas herramientas de interpolación geo estadística entre sus funciones (ver [figura 25](#)) por lo que es necesario ejecutar la opción *Geostatistical Analyst* >> *Geostatistical Wizard* en donde se abre un cuadro de dialogo donde se pueden elegir diversos métodos de interpolación entre los que están *Kriging/Cokriging*. En este cuadro también se escoge la variable que se desea interpolar, tiempo promedio de viaje o gradiente de ahorro, para nuestro caso. En el siguiente cuadro se elige el tipo de Kriging, *Ordinario* y el modelo *predictor (prediction)*.

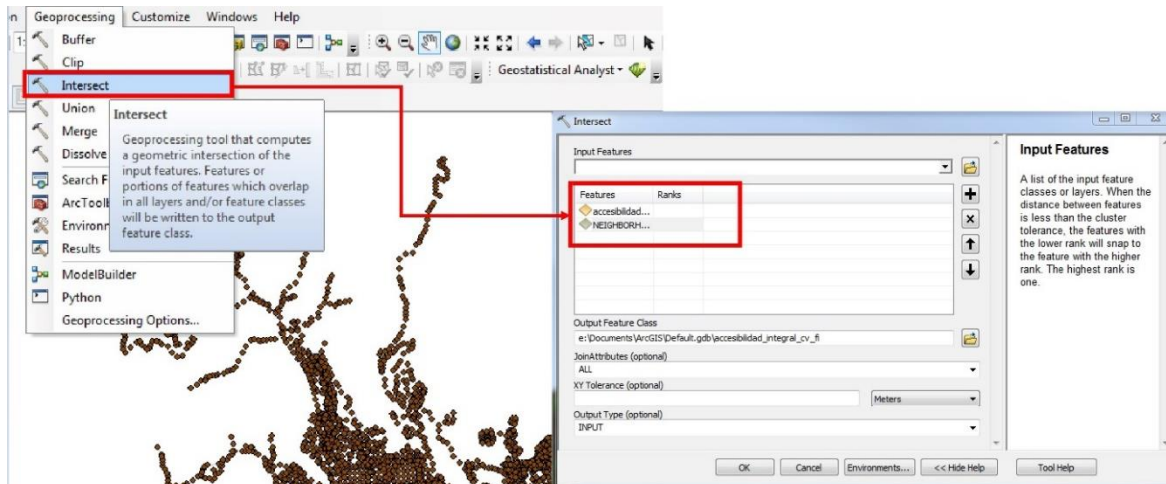
Figura 25 Modelo geo estadístico en ArcGis.



Fuente: Elaboración Propia.

Luego de esto, es posible obtener el modelo geo estadístico, el cual es relacionado con el polígono de barrios para obtener las curvas isócronas además de poder hacer análisis relacionados con la cobertura de población mediante la herramienta *Geoprocessing*>>*Intersect* (ver [Figura 26](#)), en donde se incluyen el polígono de las curvas isócronas de accesibilidad o gradiente de ahorro y el polígono de barrios lo que permitirá relacionar la cobertura de las curvas con la población de los diferentes barrios y comunas.

Figura 26 Intersección de polígonos en ArcGis.



Fuente: Elaboración Propia.

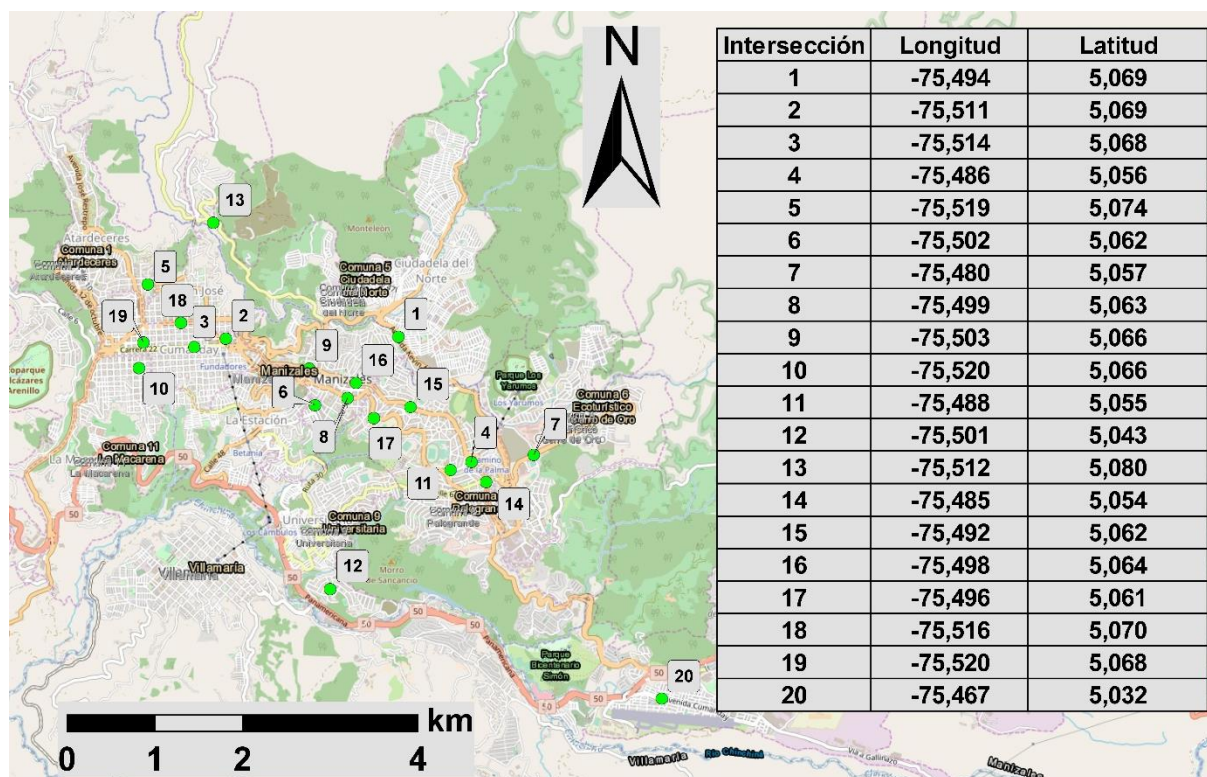
4. Resultados

4.1 Análisis de priorización y datos recolectados, intersecciones viales

En la [figura 27](#) se presenta la ubicación geo espacial de las veinte (20) intersecciones viales resultantes del análisis de priorización descrito en la fase 1 de la metodología de investigación. Entre las intersecciones priorizadas para análisis se tiene que un 45% pertenecen a intersecciones con canalización de tráfico mediante señalización horizontal o vertical, seguidas por intersecciones simples con un 40% y finalmente un 15% de las intersecciones viales son canalizadas mediante infraestructura. Por otro lado, el 50% de las intersecciones tienen semáforo como medio para regular tráfico, mismo porcentaje para aquellas que son reguladas mediante PARE o CEDA EL PASO. Asimismo, el 45% de las intersecciones se ubican sobre una vía arteria principal de la ciudad lo que hace que el flujo de vehículos sea alto y permanente, mientras el 35% de las intersecciones se ubican sobre vías arterias secundarias, donde el flujo vehicular es moderado. Para vías colectoras se tiene un 20% del total de intersecciones priorizadas, dejando de lado las intersecciones ubicadas sobre vías locales. Por otra parte, es importante registrar que se tienen un total de 14 intersecciones que han sido analizadas en estudios de seguridad vial, un 70% del total de intersecciones viales analizadas en esta investigación, que además representa un 34% del total de intersecciones que han sido objeto de este mismo análisis en estudios realizados por la Universidad Nacional de Colombia y contratados por la alcaldía de Manizales para los años 2016 y 2017. Finalmente, para la investigación es de suma importancia el estudio de los giros a la izquierda que posean conflicto con tráfico directo por lo que el 75 % de las intersecciones a analizar poseen por lo menos uno de estos giros.

A continuación, se abordará más a fondo el resultado del análisis de priorización producto de cada intersección vial, así como los resultados del análisis de datos de cada una de ellas. Entre las descripciones de cada intersección vial se presenta la fecha y la hora en el que se realizó el trabajo de campo, dicha hora se presenta en formato de 24 horas.

Figura 27 Georreferenciación de intersecciones viales resultadas del análisis de priorización.



Fuente: Elaboración Propia.

4.1.1 Intersección Vial 1

Esta intersección se encuentra ubicada sobre la avenida Kevin Ángel (ver [figura 28 a](#)), vía arteria principal de la ciudad de Manizales, sobre las coordenadas geográficas -75,494 de Longitud oeste y 5,069 de Latitud norte. Entre sus características principales se enumera que es una intersección vial regularizada por semáforo y que cuenta con canalización mediante infraestructura. Además, posee dos carriles por sentido y un ciclo prioritario para el giro a la izquierda que conduce al barrio Villa Hermosa. Asimismo, posee análisis previos en auditorías en seguridad vial. Por otro lado, el análisis de los conflictos se puede observar en la [figura 28 b](#), donde se tienen 2 conflictos por convergencia y divergencia de flujos, así como 2 conflictos entre giro a la izquierda y tráfico directo y múltiples conflictos entre peatones y vehículos, los cuales poseen ciclos prioritarios para el paso por la intersección vial y un puente peatonal a menos de 20 metros de la intersección, desde donde se hicieron las grabaciones para su posterior análisis. En el número de giros, se registra un giro a la izquierda con conflicto con tráfico directo y dos giros a la derecha simples.

Figura 28 Intersección vial 1 (a). Conflictos intersección vial 1 (b).



Fuente: Elaboración Propia.

Por lo tanto, el resultado del análisis de priorización para esta intersección se puede resumir en la [tabla 3](#).

Tabla 3 Análisis de priorización intersección vial 1.

Intersección vial 1			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección canalizada por infraestructura	7
2	Tipo de regulación de tráfico	Semáforo	10
3	Número de giros	1 GI-TD, 2 GD-S	10
4	Ubicación de la intersección	Vía Arteria Principal	10
5	Relación con análisis de seguridad vial	Existe registro de Auditorias en seguridad vial	10
TOTAL			47

Fuente: Elaboración Propia.

La toma de datos se realizó el miércoles 07 de marzo de 2018 entre las 16:10 y 17:10 (ver [figura 29 a](#)), del cual se pudieron analizar los tres giros antes mencionados (uno a la izquierda y dos a la derecha), los cuales son nombrados según la norma RILSA mencionada en la [sección 2.2.6](#) y pueden observarse en la [figura 29 b](#). Los demás movimientos no son nombrados ya que son irrelevantes para esta investigación. Cabe resaltar que, para el cálculo de las penalidades por giro, se agruparon los diferentes

movimientos a la derecha e izquierda de cada intersección que fueron registrados, con el fin de formar un conjunto de análisis. En las demás intersecciones se realizó el procedimiento anterior de nombramiento y agrupación de movimientos.

Figura 29 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 1.



Fuente: Elaboración Propia.

Para el movimiento 5, el cual se convierte en el análisis de giro a la izquierda para esta intersección, se registraron un total de 295 tiempos, de los cuales 150 (50,8%) pertenecen a automóviles, 21 (7,11%) son de buses o camiones y 124 (42,03%) de motocicletas. En la [tabla 4](#) se observan los datos agrupados en la tabla de frecuencia, con 9 intervalos. En la [gráfica 1](#) se observa la ojiva porcentual de frecuencia relativa acumulada para los tiempos correspondientes al movimiento 5 de la intersección 1 donde el 49% de los datos se agrupan hasta el intervalo de frecuencia 4, lo que nos indica que casi la mitad de los datos se agrupan en estos primeros intervalos de frecuencia lo que ocasiona que las medidas de tendencia central sean atraídas hacia estos. Por otro lado, en los intervalos de frecuencia entre 7 y 10, se agrupan tan solo el 4% de los datos obtenidos, lo que nos indica que los tiempos altos, son muy pocos. Por otro lado, para este movimiento la media aritmética corresponde 35,24 segundos con una desviación estándar de 12,4.

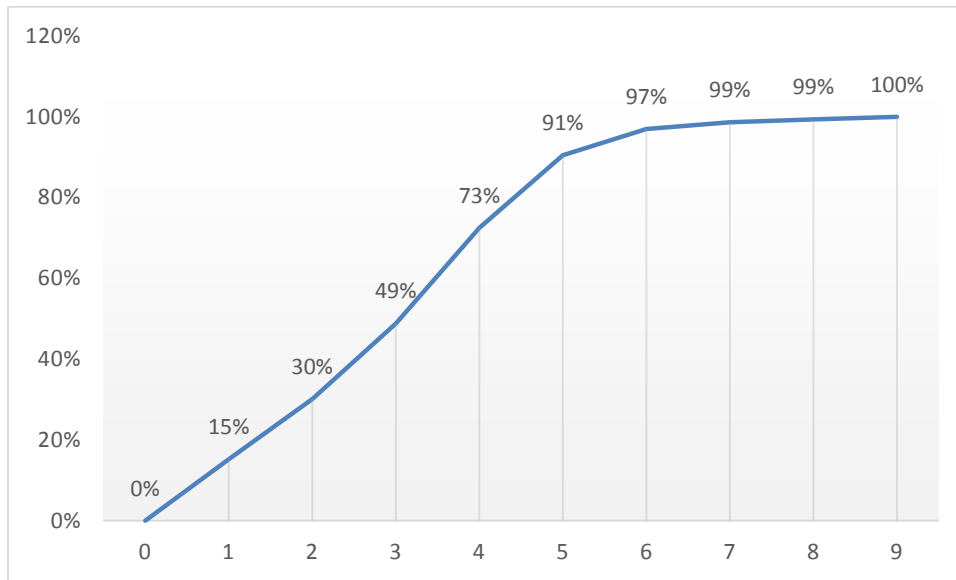
Tabla 4 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 1.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	0	11	5,5	45	45	15%	15%
2	12	23	17,5	89	44	15%	30%
3	24	35	29,5	144	55	19%	49%
4	36	47	41,5	214	70	24%	73%
5	48	59	53,5	267	53	18%	91%
6	60	71	65,5	286	19	6%	97%
7	72	83	77,5	291	5	2%	99%

8	84	95	89,5	293	2	1%	99%
9	96	107	101,5	295	2	1%	100%
			Total		295	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 1 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 1.



Fuente: Elaboración Propia.

Para el análisis de los tiempos de giro de esta intersección se agrupan los datos de los movimientos 9(4) (100 datos) y 9(2) (24 datos) obteniendo un total de 124 datos, agrupados en la [tabla 5](#), donde se observan 8 intervalos de clase y 48 datos para el intervalo de clase 1 que corresponde a tiempos entre 0 y 7 segundos lo que nos indica que los tiempos de giro a la derecha tienen una tendencia a ser bajos en esta intersección vial. La media aritmética resulta en 23,62 segundos y la desviación estándar en 5,09.

Tabla 5 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 1.

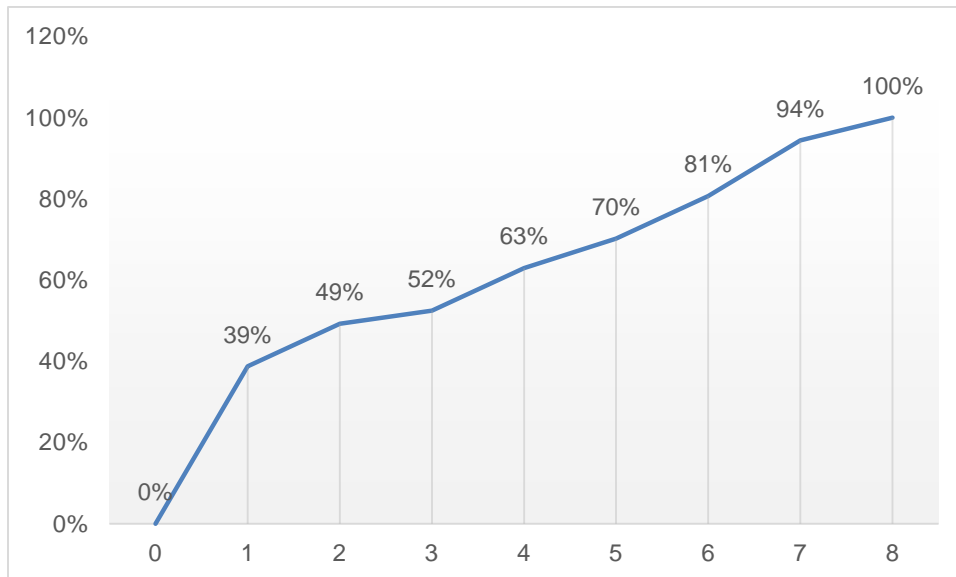
Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	0	7	3,5	48	48	39%	39%
2	8	15	11,5	61	13	10%	49%
3	16	23	19,5	65	4	3%	52%
4	24	31	27,5	78	13	10%	63%
5	32	39	35,5	87	9	7%	70%
6	40	47	43,5	100	13	10%	81%
7	48	55	51,5	117	17	14%	94%
8	56	63	59,5	124	7	6%	100%

			Total		124	100%	
--	--	--	-------	--	-----	------	--

Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, en la [gráfica 2](#) se observa la ojiva porcentual de frecuencia relativa acumulada para los tiempos correspondientes al giro a la derecha de la intersección 1 donde el 52% de los datos se agrupan hasta el intervalo de frecuencia 4, lo que nos indica que un poco más de la mitad de los datos se agrupan en estos 4 primeros intervalos de frecuencia lo que ocasiona que las medidas de tendencia central sean atraídas hacia estos.

Gráfica 2 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 1.



Fuente: Elaboración Propia.

4.1.2 Intersección Vial 2

Esta intersección se encuentra ubicada cerca al centro histórico de la ciudad de Manizales, sobre una vía arteria secundaria, en las coordenadas geográficas -75,511 de Longitud oeste y 5,069 de Latitud norte. Es una intersección simple, de cuatro ramales, donde sus flujos cuentan con una sola dirección y dos carriles por cada uno de ellos. Posee un alto flujo vehicular, en el sentido este-oeste debido a que es la principal conexión de la Avenida Kevin Ángel con el centro de la ciudad y con la Avenida Gilberto Álzate. Por otro lado, se encuentra regulada por señalización tipo PARE, la cual da prioridad al flujo este-oeste. En cuanto al análisis de los giros y conflictos (ver [figura 30 b](#)), se tienen dos conflictos por convergencia y divergencia de flujo, así como cuatro por tráfico directo entre vehículos. En cuanto a los conflictos con los peatones, estos poseen dos pasos peatonales tipo cebra, por lo que existen cuatro posibles conflictos entre peatón y vehículos. Sobre este punto se han realizado auditorías en seguridad vial, debido a la cercanía de puntos de intereses

general como centros comerciales, centros culturales, instituciones educativas y centros de culto.

Figura 30 Intersección vial 2 (a). Conflictos intersección vial 2 (b).



Fuente: Elaboración Propia.

En la [tabla 6](#) se puede apreciar el resultado del análisis de priorización realizado para esta intersección vial.

Tabla 6 Análisis de priorización intersección vial 2.

Intersección vial 2			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección simple	10
2	Tipo de regulación de tráfico	PARE	5
3	Número de giros	1 GI-S, 1 GD-S	6
4	Ubicación de la intersección	Vía Arteria Secundaria	8
5	Relación con análisis de seguridad vial	Existe registro de Auditorias en seguridad vial	10
TOTAL			39

Fuente: Elaboración Propia.

La toma de video se realizó el miércoles 28 de febrero de 2018 entre las 11:30 y 12:30 (ver figura 31 a), buscando obtener un mayor flujo de vehículos ya que en este intervalo comienzas los viajes entre el trabajo y/o la escuela hacia el hogar. De este, se pudieron analizar los dos giros que posee la intersección vial, un giro a la izquierda simple

(movimiento 6) y un giro a la derecha simple (movimiento 9(4)) (ver [figura 31 b](#)), por lo que para este caso el análisis estadístico de cada movimiento mediante tabla de frecuencias resultará en los tiempos de giro a derecha e izquierda.

Figura 31 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 2.



Fuente: Elaboración Propia.

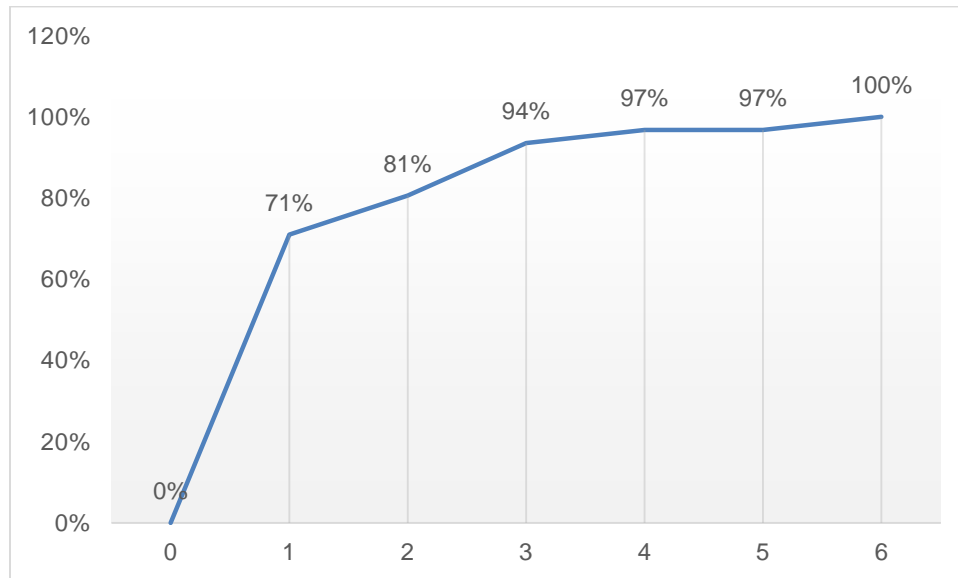
En el giro a la izquierda (movimiento 6) se registraron 31 tiempos, de los cuales 20 corresponden a motocicletas, 9 a vehículos y 2 a buses o camiones. La [tabla 7](#) se observa la tabla de frecuencia para este movimiento donde el 71% de los datos se agrupa en el primer intervalo de análisis. La media aritmética alcanza 11,63 segundos, mientras que la desviación estándar llega a 11,30 lo que nos indica que existen algunos datos (3%) que poseen una dispersión muy grande, generando esta disparidad.

Tabla 7 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, Intersección Vial 2.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	1	10	5,5	22	22	71%	71%
2	11	20	15,5	25	3	10%	81%
3	21	30	25,5	29	4	13%	94%
4	31	40	35,5	30	1	3%	97%
5	41	50	45,5	30	0	0%	97%
6	51	60	55,5	31	1	3%	100%
			Total		31	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 3 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 2.



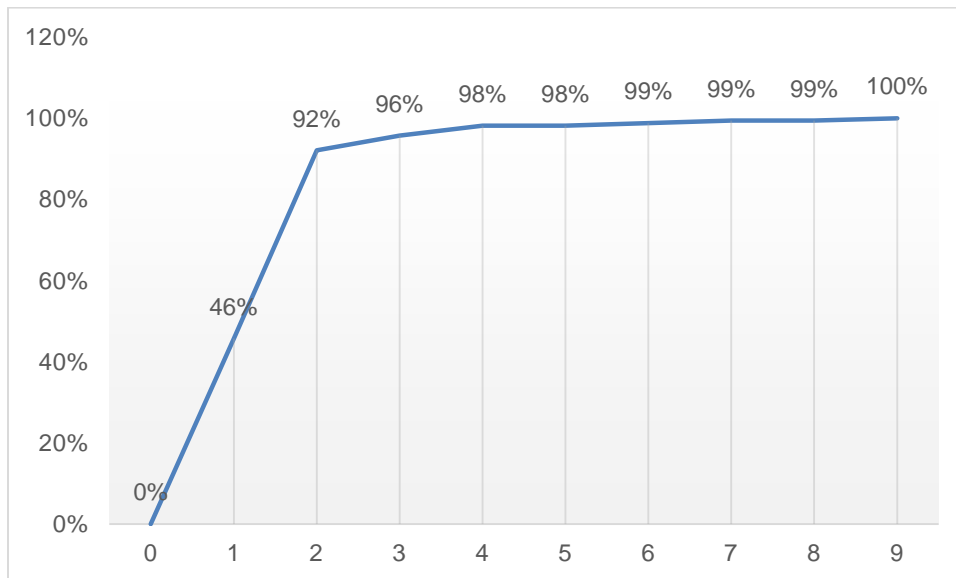
Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado, el giro a la derecha (movimiento 9(4)) alcanza un total de 164 datos, agrupados en 9 intervalos de frecuencia. Entre estos, los dos primeros intervalos agrupan el 92% de los datos (ver [tabla 8](#) y [gráfica 4](#)), la media aritmética es de 3,56 segundos con una desviación estándar de 1,9.

Tabla 8 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 2.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	1	2,5	1,75	75	75	46%	46%
2	3,5	5	4,25	151	76	46%	92%
3	6	7,5	6,75	157	6	4%	96%
4	8,5	10	9,25	161	4	2%	98%
5	11	12,5	11,75	161	0	0%	98%
6	13,5	15	14,25	162	1	1%	99%
7	16	17,5	16,75	163	1	1%	99%
8	18,5	20	19,25	163	0	0%	99%
9	21	23	22	164	1	1%	100%
			Total		164	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

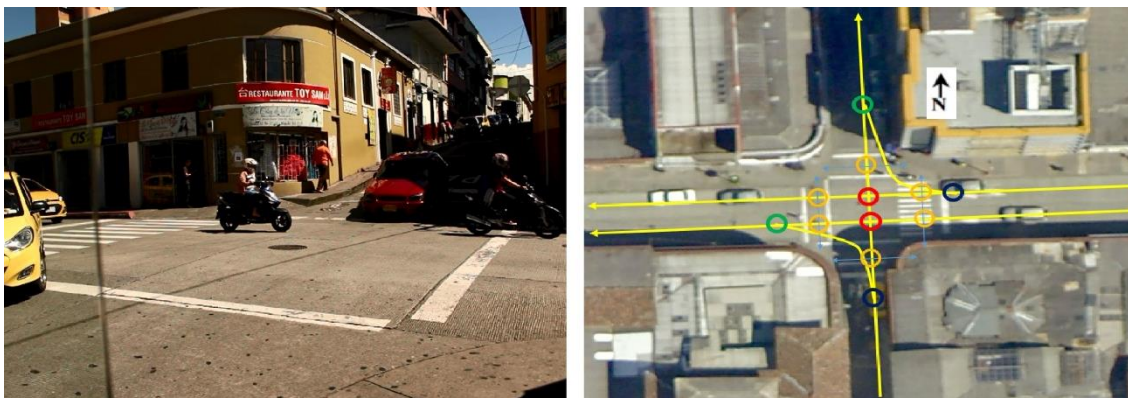
Gráfica 4 Ojiva porcentual giro a la derecha intersección vial 2.

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.3 Intersección Vial 3

Emplazada en el centro de la ciudad de Manizales, esta intersección simple (ver figura 32 a) ubicada en las coordenadas geográficas -75,514 de Longitud oeste y 5,068 de Latitud norte, sobre una vía arteria secundaria y está regulada por señalización tipo PARE. En muchos aspectos es similar a la intersección 2, por lo que la tabla 6 resume el análisis de priorización de ambas. Esta intersección vial es importante debido a que ayuda a representar los tiempos de giro presentes en el centro histórico de la ciudad. La diferencia principal entre ambas intersecciones es que, en sentido sur-norte, la intersección 3 posee tan solo un carril mientras la intersección 2 posee dos, esto disminuye los conflictos de tráfico directo entre vehículos a dos (ver [figura 32 b](#)).

Figura 32 intersección vial 3 (a). Conflictos intersección vial 3 (b).



Fuente: Elaboración Propia.

La toma de video (ver [Figura 33 a](#)) se realizó el jueves 1 de marzo de 2018 entre las 14:00 y 15:00. En este caso, debido a la perspectiva tomada, solo se puede apreciar en su totalidad el movimiento 6 de giro a la izquierda por lo que tan solo se realizará el análisis estadístico de tiempos de giro a la izquierda. El movimiento 9(4) de giro a la derecha, no se aprecia en su totalidad por lo que es imposible distinguir en que momento el vehículo comienza el movimiento. Está es uno de los limitantes de utilizar cámara fija a nivel de piso, limita el registro y la perspectiva de los movimientos en la intersección.

Figura 33 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 3.



Fuente: Elaboración Propia.

En la [tabla 9](#) se observa la tabla de frecuencias para el giro a la izquierda (movimiento 6), con un total de 126 datos agrupados en 8 intervalos de clase. En este caso, el 37% de los datos están agrupados en el primer intervalo, además, más de la mitad (56%) se agrupan en los dos primeros intervalos de clase. La media aritmética alcanzó 37,31 segundos y la desviación estándar 11,8. Este promedio resulta alto para ser una intersección simple con regulación tipo PARE lo que nos indica que el flujo que realiza este movimiento es alto y posee un tiempo de espera considerable debido al alto flujo de vehículos en sentido este-oeste, movimiento que posee la prioridad.

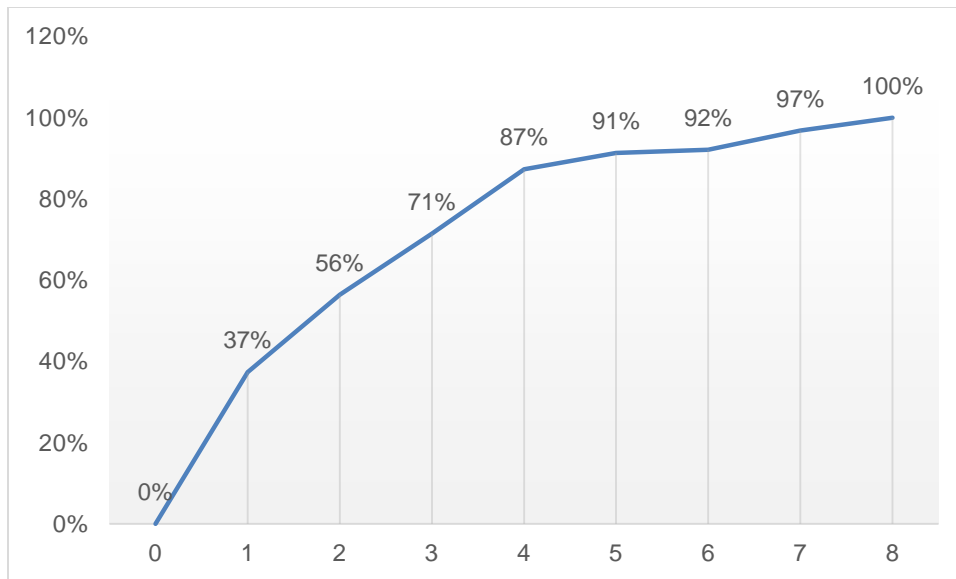
Tabla 9 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 3.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	3	18	10,5	47	47	37%	37%
2	19	34	26,5	71	24	19%	56%
3	35	50	42,5	90	19	15%	71%
4	51	66	58,5	110	20	16%	87%
5	67	82	74,5	115	5	4%	91%
6	83	98	90,5	116	1	1%	92%

7	99	114	106,5	122	6	5%	97%
8	115	131	123	126	4	3%	100%
			Total		126	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 5 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 3.



Fuente: Elaboración Propia.

4.1.4 Intersección Vial 4

Esta intersección se encuentra ubicada sobre la Avenida Santander, una de las vías arteriales principales de la ciudad, en las coordenadas geográficas -75,486 longitud oeste y 5,056 latitud norte, justo en el corazón de la zona rosa de la ciudad, donde confluyen importantes centros de atracción de viajes a nivel laboral, comercial y educativo por lo que posee un alto flujo vehicular y peatonal. Es considerada una intersección canalizada por infraestructura debido a que el giro a la derecha que se incorpora a la vía principal posee separación. Asimismo, incluye regulación semafórica donde incluye ciclos peatonales que se aprovechan de las dos fases registradas. Posee un giro a la izquierda con conflicto de tráfico directo y un giro a la derecha simple, los cuales pueden observarse en la [figura 34-b](#) junto a los diferentes conflictos de convergencia (3) y divergencia (1) de flujos, así como los conflictos entre peatón y vehículos (11).

Figura 34 Intersección vial 4 (a). Conflictos intersección vial 4 (b).



Fuente: Elaboración Propia.

Por lo tanto, el resultado del análisis de priorización para esta intersección se puede resumir en la [tabla 10](#).

Tabla 10 Análisis de priorización intersección vial 4.

Intersección vial 4			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección canalizada por infraestructura	7
2	Tipo de regulación de tráfico	Semáforo	10
3	Número de giros	1 GI-TD, 1 GD-S	8
4	Ubicación de la intersección	Vía Arteria Principal	10
5	Relación con análisis de seguridad vial	Existe registro de Auditorias en seguridad vial	10
TOTAL			45

Fuente: Elaboración Propia.

El registro de video se realizó el martes 20 de febrero de 2018 entre las 13:30 y 14:30 (ver [figura 35 a](#)), desde el segundo piso del centro comercial que queda sobre la intersección vial por lo que se tiene una buena perspectiva de los dos giros analizados, el movimiento 7 y movimiento 9(3) (ver [figura 35 b](#)).

Figura 35 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 4.

Fuente: Elaboración Propia.

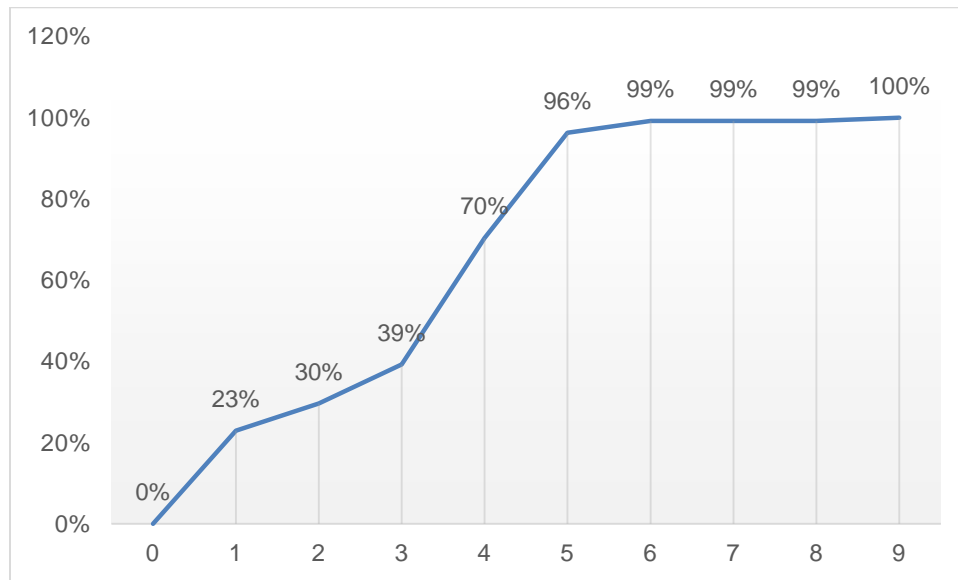
Para el movimiento 7, de giro a la izquierda, se registraron 135 datos de los que el 66% correspondían a carros, 16% a buses o camiones y 8% a motocicletas. En la [tabla 11](#) se agruparon los tiempos en una tabla de frecuencia con 9 intervalos de frecuencia. Mediante está, se calcularon la media aritmética en 50,46 segundos y 10,08 de desviación estándar.

Tabla 11 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 4.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	3	18,33	10,665	31	31	23%	23%
2	19,33	34,66	26,995	40	9	7%	30%
3	35,66	50,99	43,325	53	13	10%	39%
4	51,99	67,32	59,655	95	42	31%	70%
5	68,32	83,65	75,985	130	35	26%	96%
6	84,65	99,98	92,315	134	4	3%	99%
7	100,98	116,31	108,645	134	0	0%	99%
8	117,31	132,64	124,975	134	0	0%	99%
9	133,64	149	141,32	135	1	1%	100%
			Total		135	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 6 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 4.



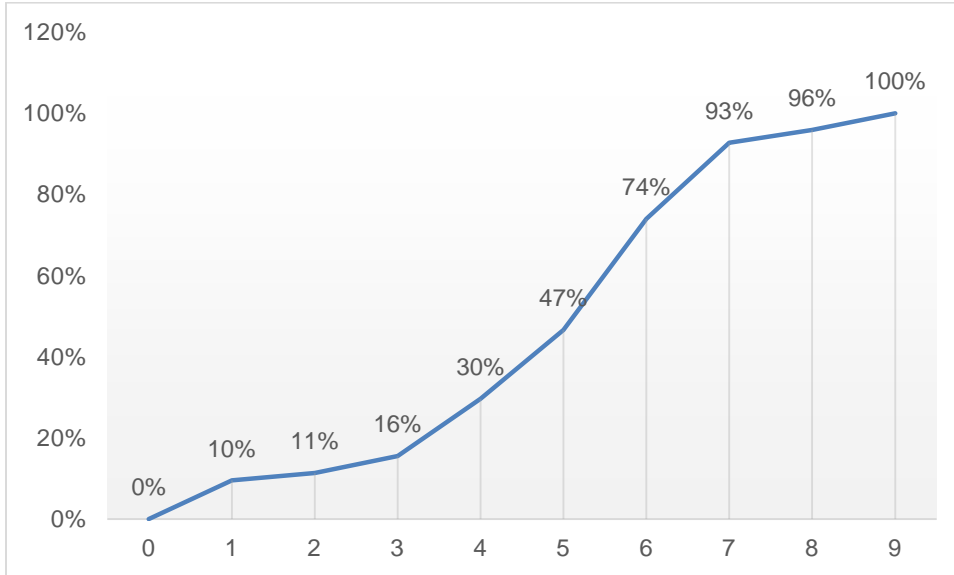
Fuente: Elaboración Propia.

Para el movimiento 9(3), que corresponde al giro a la derecha, se registraron 219 tiempos, de los cuales 161 corresponden a carros, 24 a buses o camiones y 34 a motocicletas, resultando una tabla de frecuencias con 9 intervalos, una media aritmética de 65,27 segundos y una desviación estándar de 6,1. En la ojiva porcentual de este movimiento (ver [gráfica 7](#)) se aprecia como más de la mitad de los datos se agrupa entre los intervalos 6 y 9, lo que indica que gran cantidad de los tiempos de giro son altos en gran medida por los altos tiempos de espera de los giros y el alto flujo de vehículos que se dispone a hacer dicho movimiento.

Tabla 12 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 4.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	3	15,22	9,11	21	21	10%	10%
2	16,22	28,44	22,33	25	4	2%	11%
3	29,44	41,66	35,55	34	9	4%	16%
4	42,66	54,88	48,77	65	31	14%	30%
5	55,88	68,1	61,99	102	37	17%	47%
6	69,1	81,32	75,21	162	60	27%	74%
7	82,32	94,54	88,43	203	41	19%	93%
8	95,54	107,76	101,65	210	7	3%	96%
9	108,76	122	115,38	219	9	4%	100%
			Total		219	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 7 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 4.

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.5 Intersección Vial 5

La intersección vial 5 (ver [figura 36 a](#)) se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas -75,519 de longitud oeste y 5,074 de latitud norte, sobre una vía arteria secundaria por lo que posee un flujo moderado de vehículos. Por otro lado, es una intersección simple, regulada mediante señalización PARE y ha sido objeto de estudios en seguridad vial. En cuanto a los conflictos presentados (ver [figura 36 b](#)) posee 4 conflictos de tráfico directo de vehículos, 1 conflicto por divergencia y 3 por convergencia de flujos y por ultimo 8 conflictos entre vehículos y peatones debido a que se encuentran 4 pasos peatonales señalizados. En cuanto a los giros permitidos, se presentan 2 giros a la derecha simples y 1 giro a la izquierda simple, esto se debe a que en sentido oeste-este se presenta una sola dirección hasta que se llega la intersección, mientras que en sentido este-oeste es doble sentido la calzada hasta la intersección vial. Para el sentido sur-norte se presenta una sola dirección durante toda la intersección. Asimismo, la intersección vial está ubicada sobre el Parque Liborio, cerca al mercado informal de recursos, conocido como La Galería y donde se concentran gran cantidad de talleres automotrices.

Figura 36 Intersección vial 5 (a). Conflictos intersección vial 5 (b).



Fuente: Figura 36 (a) tomada de google street view, figura 36 (b) elaboración propia.

En la [tabla 13](#), se presenta el resumen producto del análisis de priorización realizado para la intersección 5.

Tabla 13 Análisis de priorización intersección vial 5.

Intersección vial 5			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección simple	10
2	Tipo de regulación de tráfico	PARE	5
3	Número de giros	1 GI-S, 2 GD-S	9
4	Ubicación de la intersección	Vía Arteria Secundaria	8
5	Relación con análisis de seguridad vial	Existe registro de Auditorias en seguridad vial	10
TOTAL			42

Fuente: Elaboración Propia.

La toma de video (ver [figura 37 a](#)) se realizó el miércoles 14 de marzo de 2018 entre las 07:50 y 08:50 de donde se pueden apreciar de manera completa los tres giros antes mencionados, los cuales se nombran en la [figura 37 b](#).

Figura 37 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 5.

Fuente: Elaboración Propia.

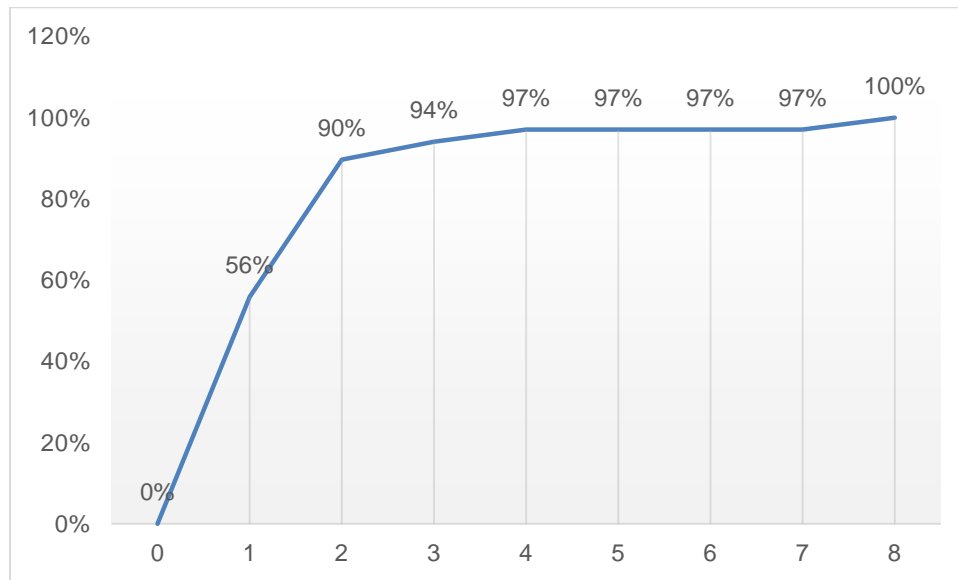
En la [tabla 14](#) se agrupan los 68 tiempos tomados para el movimiento 7, que corresponde al giro a la izquierda en la intersección, de los cuales 36 corresponden a carros, 21 a buses o camiones y 11 a motocicletas, resultando 8 intervalos de frecuencia, donde el 56% de los datos se agrupa en el primer intervalo, tal cual se puede apreciar en la [gráfica 8](#), correspondiente a la ojiva porcentual. Por último, se obtiene una media aritmética de 6,40 segundos y una desviación estándar de 5,04.

Tabla 14 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 5.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	2	5	3,5	38	38	56%	56%
2	6	9	7,5	61	23	34%	90%
3	10	13	11,5	64	3	4%	94%
4	14	17	15,5	66	2	3%	97%
5	18	21	19,5	66	0	0%	97%
6	22	25	23,5	66	0	0%	97%
7	26	29	27,5	66	0	0%	97%
8	30	35	32,5	68	2	3%	100%
			Total		68	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 8 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 5.



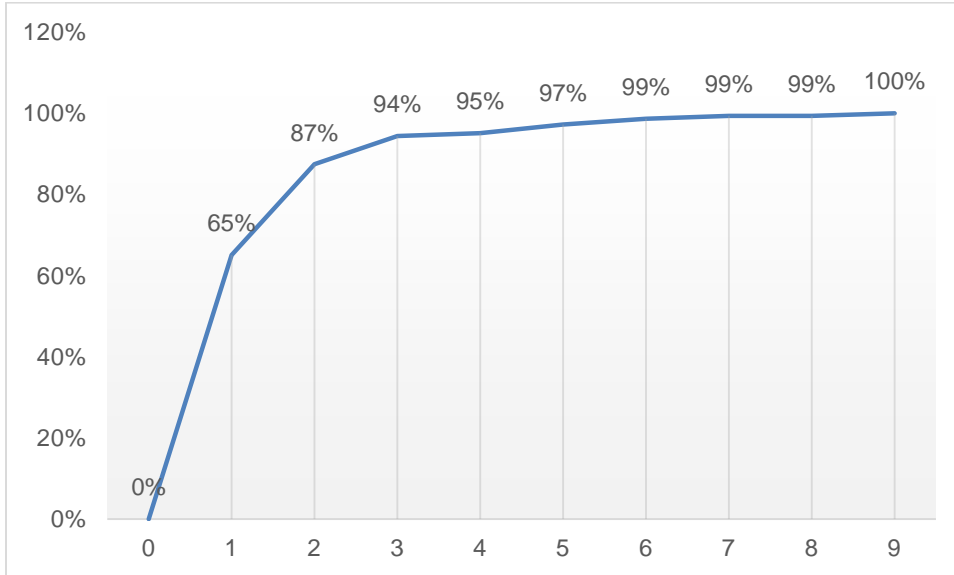
Fuente: Elaboración Propia.

Para el análisis del giro a la derecha, se agrupan los datos registrados para el movimiento 9(4) y 9(2). En la [tabla 15](#) se pueden observar los 143 datos registrados de giro a la derecha, agrupados en 9 intervalos de frecuencia. En la ojiva porcentual se percibe como el 65% de los datos se agrupan en el intervalo 1 mientras que tan solo el 1% lo hacen en los últimos 4 intervalos lo que genera una alta dispersión y por lo tanto una desviación estándar alta. La media aritmética alcanza 8,82 segundos y la desviación estándar 5,6.

Tabla 15 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 5.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	2	7,44	4,72	93	93	65%	65%
2	8,44	13,88	11,16	125	32	22%	87%
3	14,88	20,32	17,6	135	10	7%	94%
4	21,32	26,76	24,04	136	1	1%	95%
5	27,76	33,2	30,48	139	3	2%	97%
6	34,2	39,64	36,92	141	2	1%	99%
7	40,64	46,08	43,36	142	1	1%	99%
8	47,08	52,52	49,8	142	0	0%	99%
9	53,52	60	56,76	143	1	1%	100%
			Total		143	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 9 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 5.

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.6 Intersección Vial 6

Esta Intersección (ver [figura 38 a](#)) se encuentra ubicada en las coordenadas -75,502 de longitud oeste y 5,062 de latitud norte, sobre una vía colectora, posee tres ramales y se considera una intersección simple. Asimismo, posee tipo de regulación mediante señalización PARE debido a que el flujo de vehículos es moderado. Está influenciada por usos del suelo institucional, debido a la cercanía del hospital departamental y un centro de trabajo temporal, que posee numerosas plazas. En cuanto al análisis de conflictos (ver [figura 38 b](#)), posee 2 conflictos entre giro a la izquierda y tráfico directo, así como 3 conflictos tanto como por convergencia y divergencia de flujos. La intersección no posee pasos peatonales demarcados lo que ocasiona 6 conflictos entre peatón y vehículos. Esto nos indica que se pueden analizar 2 giros a la izquierda con conflicto de tráfico directo y 2 giros a la derecha simple. Por último, la intersección posee registro de análisis en seguridad vial.

Figura 38 Intersección vial 6 (a). Conflictos intersección vial 6 (b).



Fuente: Elaboración Propia.

En la [tabla 16](#) se observa el resumen del análisis de priorización propio de esta intersección.

Tabla 16 Análisis de priorización, intersección vial 6.

Intersección vial 6			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección simple	10
2	Tipo de regulación de tráfico	PARE	5
3	Número de giros	2 GI-TD, 2 GD-S	10
4	Ubicación de la intersección	Vía Colectora	7
5	Relación con análisis de seguridad vial	Existe registro de Auditorias en seguridad vial	10
TOTAL			42

Fuente: Elaboración Propia.

El viernes 16 de marzo del 2018 entre las 15:00 y 16:00 horas se realizó el registro de video para esta intersección vial (ver [figura 39 a](#)), desde donde se pudieron registrar los 4 giros descritos anteriormente y nombrados según se indica en la [figura 39 b](#).

Figura 39 Toma de video (a) y nombre de movimientos (b), intersección vial 6.

Fuente: Elaboración Propia.

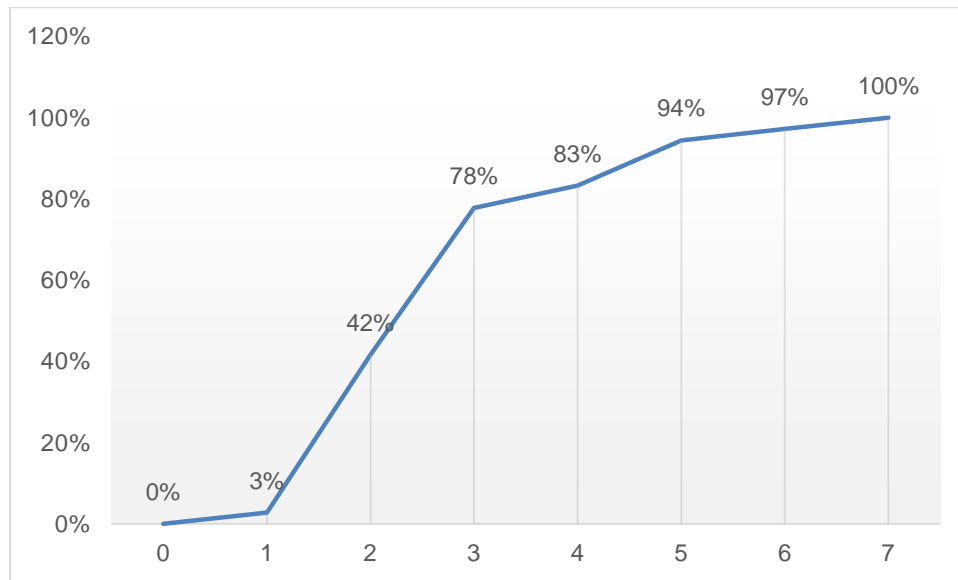
A continuación, se presenta la tabla de frecuencia para el giro a la izquierda en la intersección, conformado por los movimientos 6 y 8. En este, se registraron 36 de datos que fueron agrupados en 7 intervalos de frecuencia. Asimismo, en la gráfica de ojiva porcentual se observa como el 75% de los datos se agrupan en el intervalo 2 y 3, resultando que la media aritmética se encuentre entre estos datos 6,81 segundos y la desviación estándar 1,75.

Tabla 17 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 6.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	3	3,7	3,35	1	1	3%	3%
2	4,7	5,4	5,05	15	14	39%	42%
3	6,4	7,1	6,75	28	13	36%	78%
4	8,1	8,8	8,45	30	2	6%	83%
5	9,8	10,5	10,15	34	4	11%	94%
6	11,5	12,2	11,85	35	1	3%	97%
7	13,2	15	14,1	36	1	3%	100%
			Total		36	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 10 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 6.



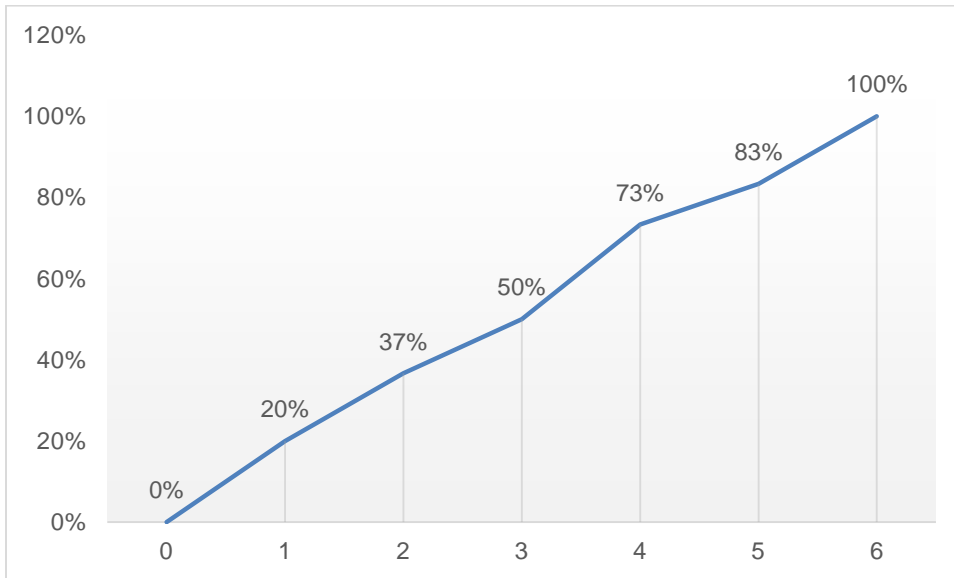
Fuente: Elaboración Propia.

En cuanto al giro a la derecha de la intersección, se tuvo en cuenta los tiempos registrados para los movimientos 9(2) y 9(3), un total de 30. Con estos, se construyó la tabla de frecuencia para datos agrupados (ver [tabla 18](#)) con un total de 6 intervalos. Entre los resultados más relevantes, en la ojiva porcentual se observa como los datos se agrupan de una forma casi uniforme entre todos los intervalos. Por otro lado, la media aritmética es de 6,35 segundos con una desviación estándar de 1,3.

Tabla 18 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 6.

Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	3	3,17	3,085	6	6	20%	20%
2	4,17	4,34	4,255	11	5	17%	37%
3	5,34	5,51	5,425	15	4	13%	50%
4	6,51	6,68	6,595	22	7	23%	73%
5	7,68	7,85	7,765	25	3	10%	83%
6	8,85	15	11,925	30	5	17%	100%
			Total		30	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 11 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 6.

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.7 Intersección Vial 7

Está intersección, la cual se encuentra ubicada en las coordenadas -75,480 de longitud oeste y 5,057 de latitud norte sobre una vía arteria secundaria, la cual es la principal entrada para el barrio La Sultana, uno de los más importantes de la ciudad, por lo que existe un alto flujo vehicular, incluidas numerosas rutas de transporte público colectivo urbano. Se considera una intersección con canalización mediante señalización, debido a que posee exclusividad para el giro a la izquierda, así como regulación mediante semáforo. En cuanto a los conflictos presentes en la intersección (ver [figura 40 b](#)), debido a la gran cantidad de movimientos permitidos, existe multiplicidad de conflictos, entre ellos 8 conflictos entre tráfico directo, 5 por divergencia y 4 por convergencia de flujos, 3 conflictos entre giro a la izquierda y tráfico directo y cerca de 8 entre vehículos y peatones, si se utilizan los pasos permitidos. Además, en esta intersección se realizaron estudios en seguridad vial.

Figura 40 Intersección vial 7 (a). Conflictos intersección vial 7 (b).



Fuente: Figura 8(a) tomada de google street view, figura 8(b) elaboración propia.

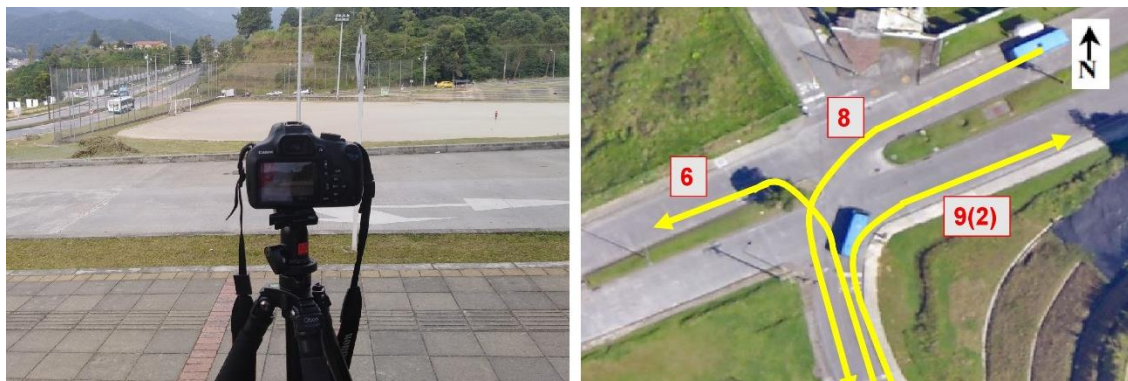
En la [tabla 19](#) se observa el resumen del análisis de priorización realizado para dicha intersección.

Tabla 19 Análisis de priorización, intersección vial 7.

Intersección vial 7			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección canalizada mediante señalización	8
2	Tipo de regulación de tráfico	Semáforo	10
3	Número de giros	1 GI-TD, 3 GD-S	10
4	Ubicación de la intersección	Vía Arteria Secundaria	8
5	Relación con análisis de seguridad vial	Existe registro de Auditorias en seguridad vial	10
TOTAL			46

Fuente: Elaboración Propia.

La toma de video (ver [figura 41 a](#)) se realizó entre las 16.00 y 17:00 del jueves 15 de marzo del 2018, desde una perspectiva que permitía analizar todos los movimientos presentes. Al momento de realizar el análisis del video se optó por registrar los tiempos de los movimientos presentes en la [figura 41 b](#) ya que poseían suficientes datos como para ser significativo el análisis posterior.

Figura 41 Toma de video (a) y nombre de movimientos (b), intersección vial 7.

Fuente: Elaboración Propia.

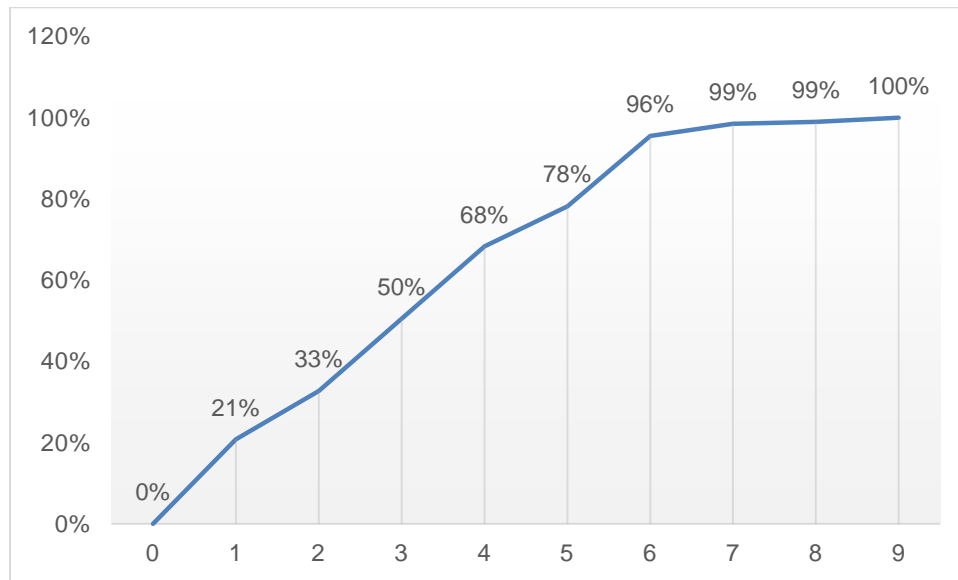
Para el análisis del giro a la izquierda, se tomaron los datos de los movimientos 6 y 8 y se agruparon en la [tabla 20](#), junto a la gráfica de ojiva porcentual donde se puede constatar que el 50% de los datos se agrupan en los primeros 3 de los 9 intervalos de frecuencia. Finalmente, la media aritmética alcanza 42,67 segundos con una desviación estándar de 6,31.

Tabla 20 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 7.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	4	15,78	9,89	42	42	21%	21%
2	16,78	28,56	22,67	66	24	12%	33%
3	29,56	41,34	35,45	102	36	18%	50%
4	42,34	54,12	48,23	138	36	18%	68%
5	55,12	66,9	61,01	158	20	10%	78%
6	67,9	79,68	73,79	193	35	17%	96%
7	80,68	92,46	86,57	199	6	3%	99%
8	93,46	105,24	99,35	200	1	0%	99%
9	106,24	119	112,62	202	2	1%	100%
			Total		202	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 12 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 7.



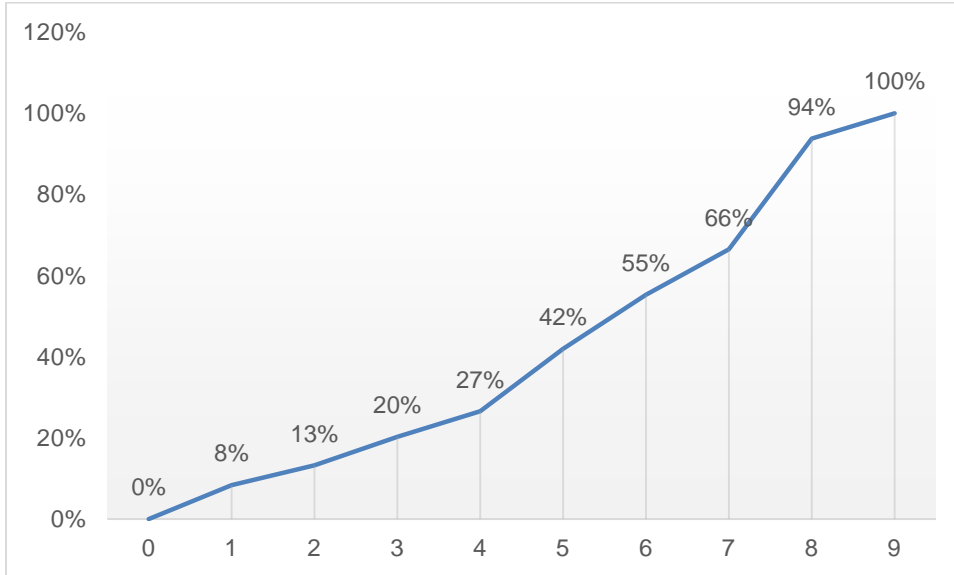
Fuente: Elaboración Propia.

Para el análisis del giro a la derecha en esta intersección, se tuvo en cuenta el movimiento 9(2), de donde se registraron 143 tiempos. En la [gráfica 13](#), se puede observar como el 58% de los datos se agrupan entre el intervalo 5 y 9, lo que indica que la media aritmética tendrá un resultado alto. Dicha medida alcanzó los 51,89 segundos con una desviación estándar de 5,77.

Tabla 21 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 7.

Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	3	12,32	7,66	12	12	8%	8%
2	12,33	21,65	16,99	19	7	5%	13%
3	21,66	30,98	26,32	29	10	7%	20%
4	30,99	40,31	35,65	38	9	6%	27%
5	40,32	49,64	44,98	60	22	15%	42%
6	49,65	58,97	54,31	79	19	13%	55%
7	58,98	68,3	63,64	95	16	11%	66%
8	68,31	77,63	72,97	134	39	27%	94%
9	77,64	87	82,32	143	9	6%	100%
			Total		143	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

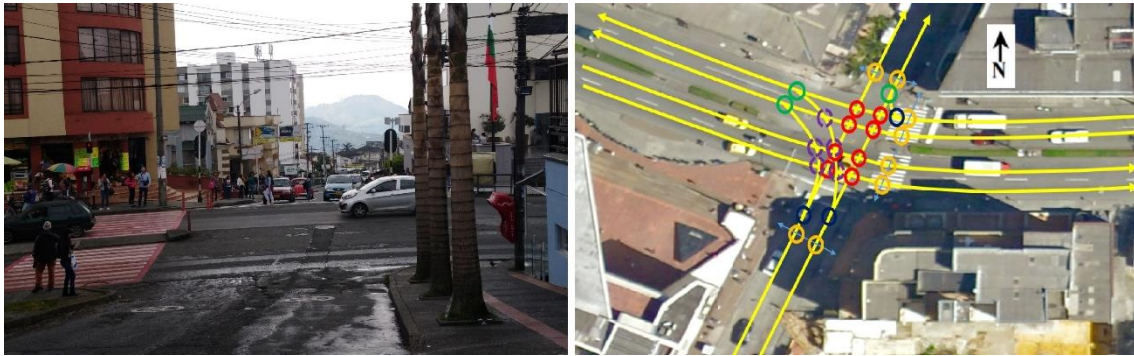
Gráfica 13 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 7.

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.8 Intersección Vial 8

Intersección vial canalizada mediante señalización horizontal (ver [figura 42 a](#)) está ubicada en las coordenadas -75,499 de longitud oeste y 5,063 de latitud norte, sobre una vía arteria principal. Además, está regulada por semáforo y en cuanto a conflictos (ver [Figura 42 b](#)) posee 8 entre tráfico directo de vehículos debido en a que el flujo en sentido sur-norte se incorpora a una avenida de dos carriles con dos sentidos, asimismo se cuentan con 4 conflictos entre giro a la izquierda y tráfico directo con 3 conflictos por divergencia y convergencia de flujos. Por último, los conflictos entre vehículos y peatones alcanzan 8, mitigados por el resultado de la auditoria en seguridad vial realizada en investigaciones anteriores que recomendó la prohibición del giro a la derecha que se incorporaba a la avenida para así darle prioridad al peatón al cruzar la avenida. En cuanto a giros, se cuenta un giro a la izquierda con tráfico directo y un giro a la derecha simple.

Figura 42 Intersección vial 8 (a). Conflictos intersección vial 8 (b).



Fuente: Elaboración Propia.

En la [tabla 22](#) se aprecia el análisis de priorización realizado para esta intersección vial.

Tabla 22 Análisis de priorización, intersección vial 8.

Intersección vial 8			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección canalizada mediante señalización	8
2	Tipo de regulación de tráfico	Semáforo	10
3	Número de giros	1 GI-TD, 1 GD-S	8
4	Ubicación de la intersección	Vía Arteria Principal	10
5	Relación con análisis de seguridad vial	Existe registro de Auditorias en seguridad vial	10
TOTAL			46

Fuente: Elaboración Propia.

Por otra parte, la toma de video (ver [Figura 43 a](#)) se realizó el jueves 1 de marzo de 2018 entre las 15:40 y 16:40, desde una perspectiva que tan solo permitía registrar en su totalidad el giro a la izquierda, que pertenece al movimiento 6 de la intersección (ver [Figura 43 b](#)).

Figura 43 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 8.

Fuente: Elaboración Propia.

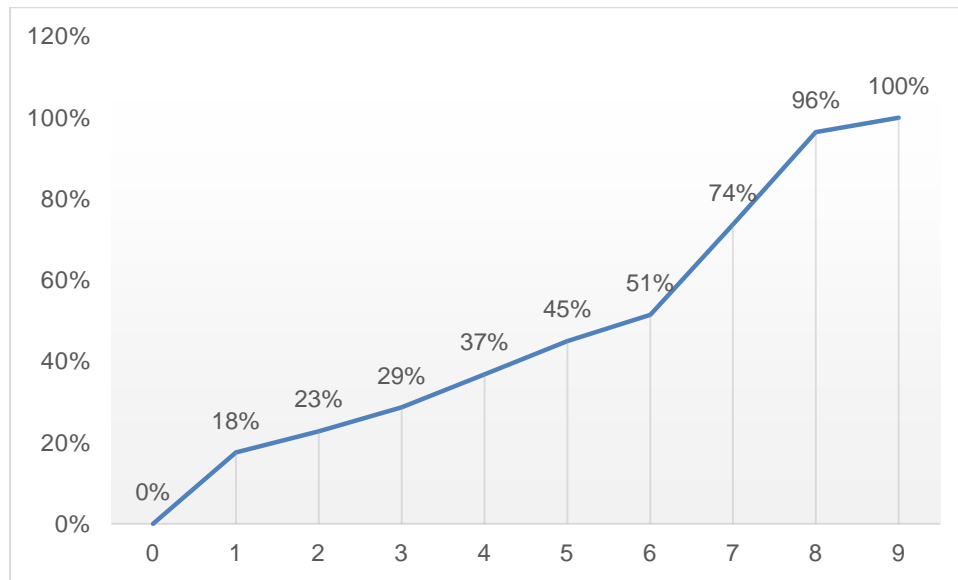
El movimiento 6, el cual corresponde al análisis del giro a la izquierda en la intersección, se resume en la tabla 23, donde se registraron 171 tiempos de los cuales 116 corresponden a vehículos, 20 a buses o camiones y 35 a motocicletas. En la ojiva porcentual (ver [gráfica 14](#)) se observa como el 51% de los datos se agrupan en los 6 primeros intervalos de frecuencia, lo que indica que el 49% de los datos se agrupan en los últimos 3 intervalos por lo que la media aritmética tenderá hacia estos datos. En conclusión, la media aritmética para este movimiento dio como resultado 49,05 segundos con una desviación estándar de 4,95.

Tabla 23 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 8.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	4	13,43	8,715	30	30	18%	18%
2	13,44	22,87	18,155	39	9	5%	23%
3	22,88	32,31	27,595	49	10	6%	29%
4	32,32	41,75	37,035	63	14	8%	37%
5	41,76	51,19	46,475	77	14	8%	45%
6	51,2	60,63	55,915	88	11	6%	51%
7	60,64	70,07	65,355	126	38	22%	74%
8	70,08	79,51	74,795	165	39	23%	96%
9	79,52	88	83,76	171	6	4%	100%
			Total		171	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 14 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 8.



Fuente: Elaboración Propia.

4.1.9 Intersección Vial 9

La intersección vial 9 (ver [figura 44 a](#)) se encuentra canalizada mediante señalización horizontal, cuenta con regulación mediante semáforo y se encuentra sobre una vía arteria principal de la ciudad, la Avenida Santander, en las coordenadas -75,503 de longitud oeste y 5,066 de latitud norte. Los conflictos presentes en esta intersección (ver [figura 44 b](#)) son numerosos, sobre todo entre el giro a la izquierda y tráfico directo con 7 ya que existen dos de estos giros que deben atravesar la avenida para converger con los otros flujos, así que también hay 2 conflictos por convergencia de flujos y 1 por divergencia de flujos. En cuanto los conflictos entre peatones y vehículos, existen 8, de los cuales 6 están protegidos por fases del semáforo que les da la prioridad. Finalmente, se presentan dos giros a la izquierda con conflicto con tráfico directo y un giro a la derecha simple.

Figura 44 Intersección vial 9 (a). Conflictos intersección vial 9 (b).



Fuente: Elaboración Propia.

En la [tabla 24](#) se observa el análisis de priorización propio de la intersección vial 9.

Tabla 24 Análisis de priorización intersección vial 9.

Intersección vial 9			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección canalizada mediante señalización	8
2	Tipo de regulación de tráfico	Semáforo	10
3	Número de giros	2 GI-TD, 1 GD-S	10
4	Ubicación de la intersección	Vía Arteria Principal	10
5	Relación con análisis de seguridad vial	Existe registro de Auditorias en seguridad vial	10
TOTAL			48

Fuente: Elaboración Propia.

El martes 6 de marzo de 2018 entre las 15:40 y 16:40 se realizó el registro de video para esta intersección vial (ver [figura 45 a](#)), donde se pudo registrar en su totalidad el movimiento 6, correspondiente a giro a la izquierda (ver [figura 45 b](#)). Aunque el giro a la derecha se podía apreciar en algún porcentaje, no se tuvo en cuenta debido a que este iniciaba con un tiempo de espera en el semáforo y acumulaba una cola de vehículos muy larga, que no se alcanza a apreciar en la perspectiva del video, antes de comenzar el giro a la derecha o continuar su curso en sentido oeste-este.

Figura 45 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 9.



Fuente: Elaboración Propia.

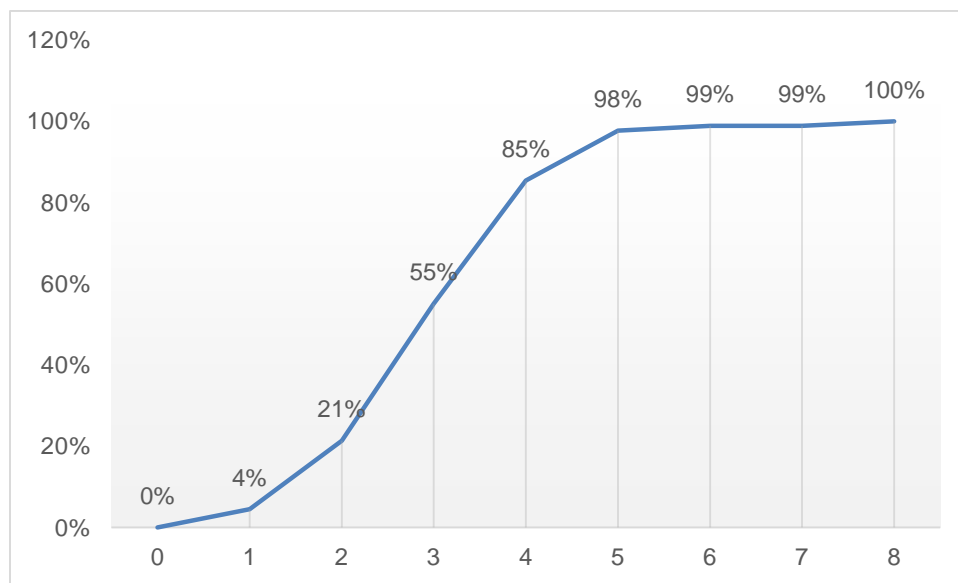
En la [tabla 25](#), se observa el análisis de los 89 tiempos registrados para el giro a la izquierda en dicha intersección vial. De estos, 54 corresponden a vehículo y el resto a motocicletas, particularmente no se observaron buses o camiones durante el análisis de videos. En la ojiva porcentual (ver [gráfica 15](#)) se observa como el 55% de los datos se agrupan en los 3 primeros intervalos por lo que la media aritmética de 50,92 segundos quedó entre estos registros. La desviación estándar de los datos alcanzó 12,78.

Tabla 25 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 9.

Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	3	19,62	11,31	4	4	4%	4%
2	19,63	36,25	27,94	19	15	17%	21%
3	36,26	52,88	44,57	49	30	34%	55%
4	52,89	69,51	61,2	76	27	30%	85%
5	69,52	86,14	77,83	87	11	12%	98%
6	86,15	102,77	94,46	88	1	1%	99%
7	102,78	119,4	111,09	88	0	0%	99%
8	119,41	136	127,705	89	1	1%	100%
			Total		89	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 15 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 9.

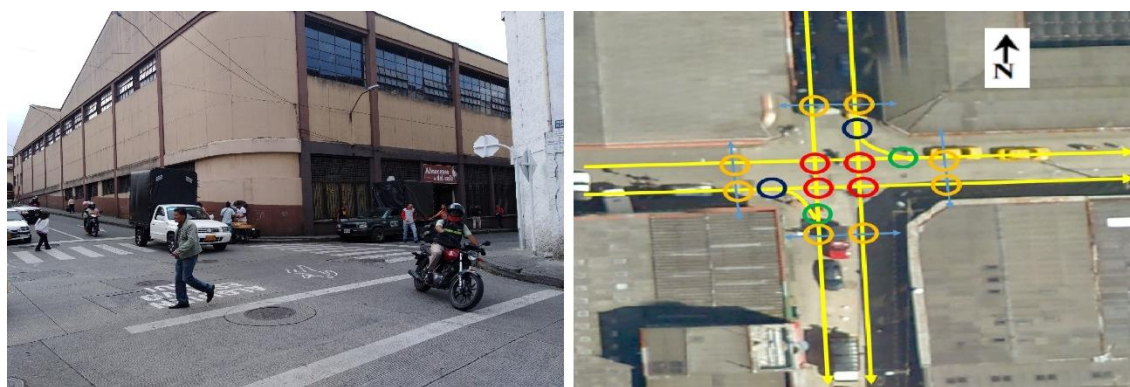


Fuente: Elaboración Propia.

4.1.10 Intersección Vial 10

Esta intersección vial se encuentra ubicada en el centro histórico de la ciudad, sobre una vía arteria secundaria en las coordenadas geográficas -75,520 de longitud oeste y 5,066 de latitud norte. Al no tener canalización, es una intersección simple regulada por señal tipo PARE. Posee 4 conflictos entre tráfico directo y 2 por convergencia y divergencia de flujos. Asimismo, 8 conflictos entre peatones y vehículos, aunque tan solo posee 2 pasos peatonales tipo cebra de prioridad al peatón y 2 pasos peatonales que da prioridad a los vehículos. Estos conflictos pueden observarse en la [figura 46 b](#). Finalmente, posee 2 giros simples a izquierda y derecha y ha sido objeto de estudios en seguridad vial.

Figura 46 Intersección vial 10 (a). Conflictos intersección vial 10 (b).



Fuente: Elaboración Propia.

El análisis de priorización de la intersección vial 10 se resume en la [tabla 26](#).

Tabla 26 Análisis de priorización intersección vial 10.

Intersección vial 10			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección simple	10
2	Tipo de regulación de tráfico	PARE	5
3	Número de giros	1 GI-S, 1 GD-S	6
4	Ubicación de la intersección	Vía Arteria Secundaria	8

5	Relación con análisis de seguridad vial	Existe registro de Auditorias en seguridad vial	10
		TOTAL	39

Fuente: Elaboración Propia.

La toma de videos (ver [figura 47 a](#)) fue realizada el viernes 16 de marzo de 2018 entre las 16.30 y 17:30, tomando una perspectiva que podía registrar los dos giros antes mencionados, los cuales son nombrados según la [figura 47 b](#).

Figura 47 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 10.



Fuente: Elaboración Propia.

En la [tabla 27](#) se observan los 145 tiempos registrados para el movimiento 5, que corresponde al giro a la izquierda, donde la media aritmética alcanza un valor de 11,26 segundos con una desviación estándar de 3,98. En la ojiva porcentual (ver [gráfica 16](#)) se observa como el 48% de los datos está incluido en el intervalo 1, porcentaje que se incrementa hasta 76 % para los dos primeros intervalos, lo que indica una tendencia de la media aritmética a acercarse a estos valores.

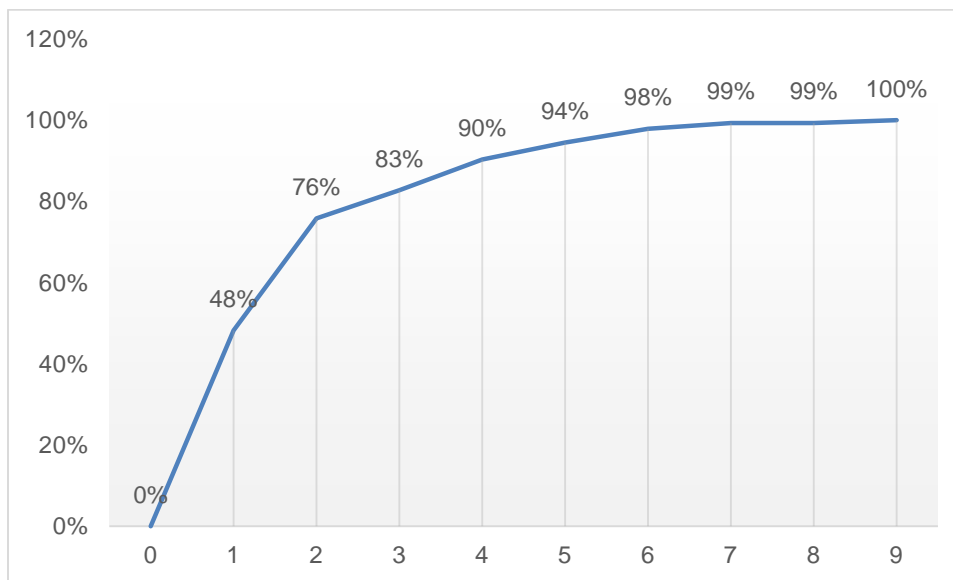
Tabla 27 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 10.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	3	8,1	5,55	70	70	48%	48%
2	8,11	13,21	10,66	110	40	28%	76%
3	13,22	18,32	15,77	120	10	7%	83%
4	18,33	23,43	20,88	131	11	8%	90%
5	23,44	28,54	25,99	137	6	4%	94%
6	28,55	33,65	31,1	142	5	3%	98%
7	33,66	38,76	36,21	144	2	1%	99%
8	38,77	43,87	41,32	144	0	0%	99%

9	43,88	49	46,44	145	1	1%	100%
			Total		145	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 16 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 10.



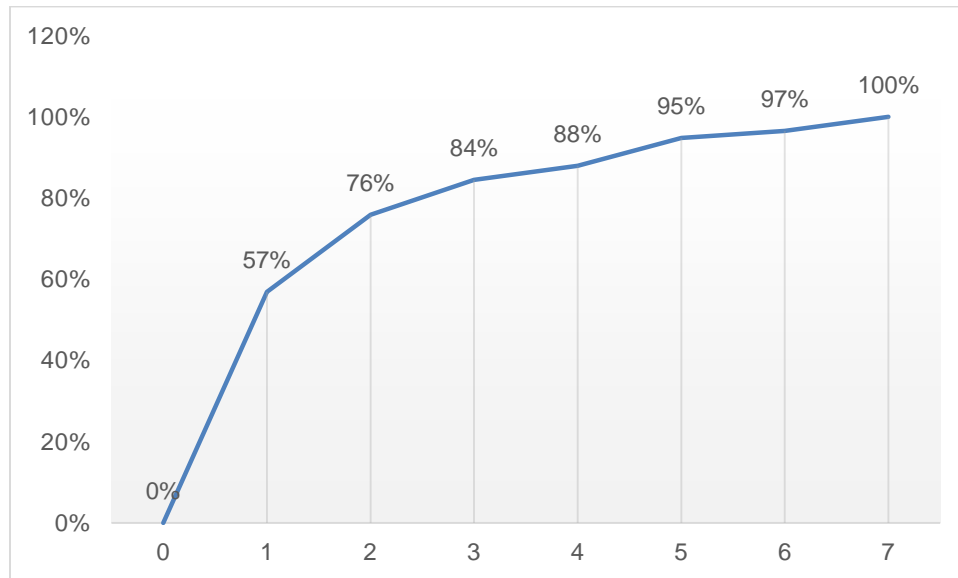
Fuente: Elaboración Propia.

Para el movimiento 9(3), que corresponde al giro a la derecha en esta intersección vial, se registraron 58 datos de donde se obtiene la media aritmética en 4,74 con una desviación estándar de 1,12, valores explicados por la amplia agrupación de los datos en el primer intervalo, tal como se observa en la ojiva porcentual de la [gráfica 17](#).

Tabla 28 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 10.

Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	3	4,13	3,565	33	33	57%	57%
2	4,14	5,27	4,705	44	11	19%	76%
3	5,28	6,41	5,845	49	5	9%	84%
4	6,42	7,55	6,985	51	2	3%	88%
5	7,56	8,69	8,125	55	4	7%	95%
6	8,7	9,83	9,265	56	1	2%	97%
7	9,84	11	10,42	58	2	3%	100%
			Total		58	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 17 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 10.

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.11 Intersección Vial 11

Esta intersección canalizada por medio de señalización, se encuentra sobre las coordenadas geográficas -75,501 de longitud oeste y 5,043 de latitud norte en una vía arteria secundaria de la ciudad, la avenida Lindsay, la cual conecta la Avenida Paralela y Avenida Santander, dos de las arterias principales de la ciudad, a la altura del Estadio Palogrande de fútbol y la Universidad Nacional de Colombia, llevando flujo constante de peatones entre las diferentes instituciones educativas, centros de recreación y comercio ubicados a lo largo de esta. Asimismo, posee semáforo como tipo de regulación y numerosos conflictos (ver [figura 48 b](#)) entre los que se enumeran: 4 conflictos entre tráfico directo, 7 entre giro a la izquierda y tráfico directo, 3 por divergencia de flujos y 5 por convergencia de flujos. Finalmente, 12 conflictos entre peatones y vehículos, con pasos peatonales tipo cebra. En este punto se han realizado estudios en seguridad vial y se cuentan con 2 giros a la izquierda con tráfico directo y 3 giros a la derecha simple.

Figura 48 Intersección vial 11 (a). Conflictos intersección vial 11 (b).

Fuente: Figura 48(a) tomada de google street view, figura 48(b) elaboración propia.

En la [tabla 29](#) se observa el resumen del análisis de priorización producto de esta intersección.

Tabla 29 Análisis de priorización intersección vial 11.

Intersección vial 11			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección canalizada por señalización	8
2	Tipo de regulación de tráfico	Semáforo	10
3	Número de giros	2 GI-TD, 3 GD-S	10
4	Ubicación de la intersección	Vía Arteria Secundaria	8
5	Relación con análisis de seguridad vial	Existe registro de Auditorias en seguridad vial	10
TOTAL			46

Fuente: Elaboración Propia.

El registro de videos (ver [figura 49 a](#)) se realizó el martes 20 de marzo de 2018 entre las 8:00 y 9:00, desde una perspectiva que permitía observar en su totalidad el movimiento 5, de giro a la izquierda y el movimiento 9(1) de giro a la derecha, tal cual se observa en la [figura 49 b](#).

Figura 49 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 11.



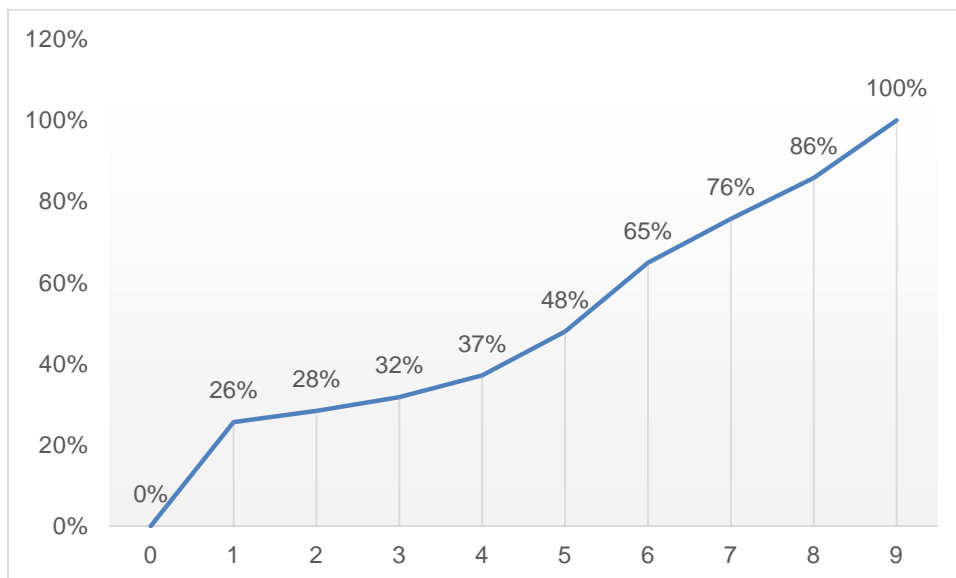
Fuente: Elaboración Propia.

En la [tabla 30](#) se observa el análisis mediante tabla de frecuencia de los 148 datos registrados para el giro a la izquierda, movimiento 5, de la intersección vial donde se observa una distribución casi uniforme entre el intervalo 5 y 9, mientras que en el primer intervalo se agrupa el 16% de los datos, tendencia que se puede comprobar mediante la [gráfica 18](#) de ojiva porcentual. Finalmente, la media aritmética resulta en 35,68 segundos con una desviación estándar de 3,9.

Tabla 30 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 11.

Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	3	10,21	6,605	38	38	26%	26%
2	10,22	17,43	13,825	42	4	3%	28%
3	17,44	24,65	21,045	47	5	3%	32%
4	24,66	31,87	28,265	55	8	5%	37%
5	31,88	39,09	35,485	71	16	11%	48%
6	39,1	46,31	42,705	96	25	17%	65%
7	46,32	53,53	49,925	112	16	11%	76%
8	53,54	60,75	57,145	127	15	10%	86%
9	60,76	68	64,38	148	21	14%	100%
			Total		148	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 18 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 11.

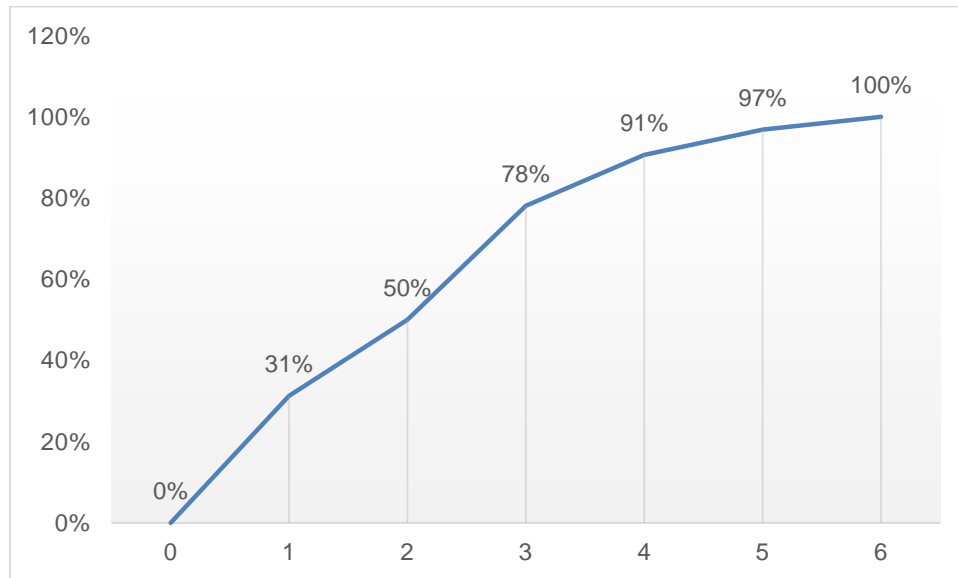
Fuente: Elaboración Propia.

Para el movimiento 9(1), correspondiente al giro a la derecha, se computaron 32 datos en la tabla de frecuencia 31. Asimismo, se obtuvieron 6 intervalos de frecuencia donde se agruparon el 50% de los registros en los primeros dos intervalos, lo cual se puede observar en la [gráfica 19](#) de ojiva porcentual. En consecuencia, la media aritmética se computó en 31,43 segundos con una media aritmética de 12,09. Este último dato nos muestra una alta dispersión entre los datos recogidos dada por el número de datos bajo respecto a otros movimientos ya analizados.

Tabla 31 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 11.

Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	3	16,99	9,995	10	10	31%	31%
2	17	30,99	23,995	16	6	19%	50%
3	31	44,99	37,995	25	9	28%	78%
4	45	58,99	51,995	29	4	13%	91%
5	59	72,99	65,995	31	2	6%	97%
6	73	87	80	32	1	3%	100%
			Total		32	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 19 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 11.

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.12 Intersección Vial 12

Esta intersección vial ubicada en las coordenadas -75,501 de longitud oeste y 5,043 de latitud norte sobre una vía colectora es una intersección simple de 4 ramales en la cual están permitidos todos los movimientos de giro por lo que los conflictos entre vehículos y vehículos con peatones son similares a los mostrados en la [figura 11](#) de la [sección 2.2.7](#). En la [figura 50a](#) se muestran los conflictos de la intersección que contabilizan 4 entre tráfico directo, 8 entre giro a la izquierda y tráfico directo, 4 entre giros a la izquierda y 4 por convergencia y divergencia de flujos. Se puede considerar que esta es la intersección simple de 4 ramales con mayor número de conflictos y mayor peligrosidad para los peatones que alcanzan 8 conflictos con los vehículos, este riesgo es mitigado por el bajo flujo vehicular. Además, se cuentan con 4 giros a la izquierda con conflicto con tráfico directo y 4 giros a la izquierda simple, cuenta con señalización tipo PARE como método de regulación de tráfico y existen registros relacionados con seguridad vial.

Figura 50 Intersección vial 12 (a). Conflictos intersección vial 12 (b).

Fuente: Elaboración Propia.

En cuanto al análisis de priorización, en la [tabla 32](#) se puede observar el resumen.

Tabla 32 Análisis de priorización intersección vial 12.

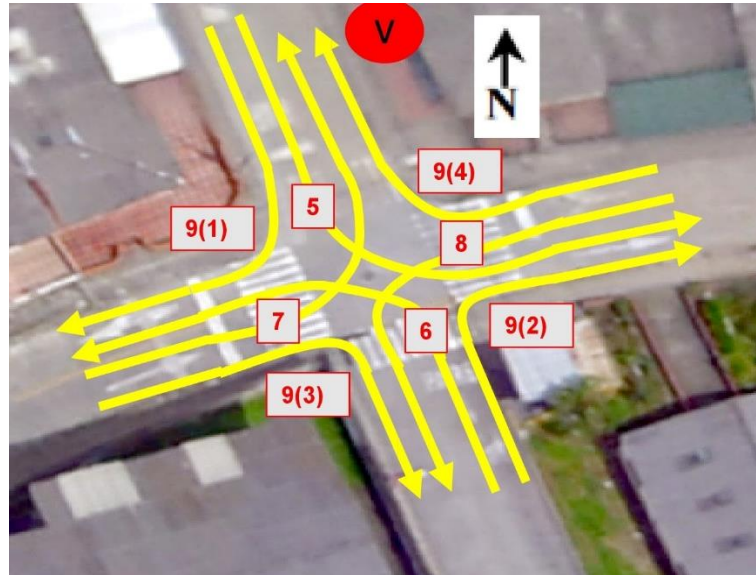
Intersección vial 12			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección Simple	10
2	Tipo de regulación de tráfico	PARE	5
3	Número de giros	4 GI-TD, 4 GD-S	10
4	Ubicación de la intersección	Vía Colectora	7
5	Relación con análisis de seguridad vial	Existe registro de Auditorias en seguridad vial	10
TOTAL			42

Fuente: Elaboración Propia.

El jueves 16 de noviembre de 2017 se realizó la toma de video de está intersección. Está intersección vial fue la escogida para realizar la prueba piloto para hacer la toma de videos, debido al alto número de giros permitidos, por tal razón es la única que está registrada durante el año anterior. También con esta se comenzó el análisis de videos, los cuales fueron divididos en un principio por movimientos (ver [figura 51 b](#)) pero sin dividir por tipo de vehículos. Por otro lado, al estar ubicado sobre una vía colectora el flujo vehicular era

mínimo por lo que el número de datos, a pesar de que se observaban de manera correcta todos los movimientos, resultó bajo.

Figura 51 Nombre de movimientos intersección vial 12.



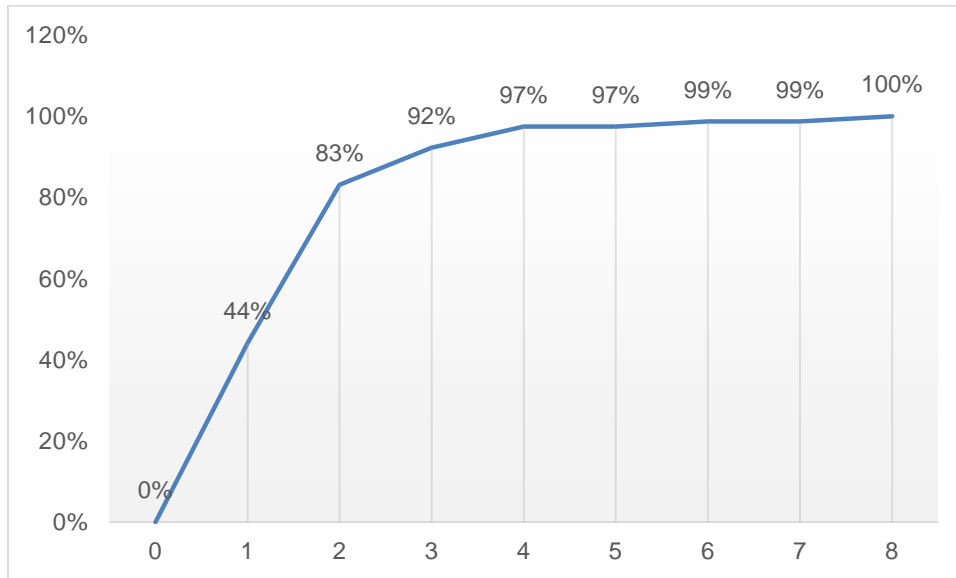
Fuente: Elaboración Propia.

Para el análisis mediante tabla de frecuencia para el giro a la izquierda, se tuvieron en cuenta los registros de los movimientos 5, 6, 7, y 8, resultando 77 datos, agrupados en 8 intervalos. La media aritmética resulto en 4,67 segundos con una desviación estándar de 1,99.

Tabla 33 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 12.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	2,24	3,99	3,115	34	34	44%	44%
2	4	5,75	4,875	64	30	39%	83%
3	5,76	7,51	6,635	71	7	9%	92%
4	7,52	9,27	8,395	75	4	5%	97%
5	9,28	11,03	10,155	75	0	0%	97%
6	11,04	12,79	11,915	76	1	1%	99%
7	12,8	14,55	13,675	76	0	0%	99%
8	14,56	16,3	15,43	77	1	1%	100%
			Total		77	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 20 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 12.

Fuente: Elaboración Propia.

Por otra parte, el análisis de giro a la derecha tan solo tuvo 23 datos registrados que, aunque se componía de 4 movimientos (9(1), 9(2), 9(3) y 9(4)). Así que al ser el número de datos menor a 25 se utilizan las formulas de la [sección 2.2.13](#) para realizar los cálculos de media aritmética y desviación estándar los cuales resultan en 3,87 segundos y 3,24 respectivamente. Al estar tan cerca la desviación estándar del valor de la media aritmética, nos indica una alta dispersión entre los valores registrados. Por ello es indispensable contar con un gran número de datos con el fin de que la desviación estándar sea baja.

4.1.13 Intersección Vial 13

En este caso, la intersección vial (ver [figura 52 a](#)) se encuentra ubicada en las coordenadas -75,512 de longitud oeste y 5,080 de latitud norte sobre una vía colectora. Dicha intersección vial es la entrada a uno de los barrios periféricos de la ciudad, Puertas del Sol, en una zona que está expuesta a procesos de expansión por lo que el flujo de vehículos es moderado pero que a futuro será considerable. Por otra parte, es una intersección simple con poca señalización y regulada por PARE. Asimismo, existen registros de auditorías en seguridad vial y posee numerosos conflictos (ver [figura 52 b](#)) entre los que se pueden enumerar: 3 entre giro a la izquierda y tráfico directo, 1 entre giros a la izquierda y 4 por convergencia y divergencia de flujos. En cuanto los conflictos entre peatones y vehículos, se cuentan con 4 conflictos, aunque no existen pasos peatonales debidamente señalizados y existe alta peligrosidad por la alta velocidad de los vehículos. En lo concerniente al número de giros, se cuentan 2 giros a la izquierda con conflicto con tráfico directo y 2 giros a la derecha simples.

Figura 52 Intersección vial 13 (a). Conflictos intersección vial 13 (b).



Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado, en la [tabla 34](#) se puede consultar el resumen del análisis de priorización propio de la intersección vial 13.

Tabla 34 Análisis de priorización intersección vial 13.

Intersección vial 13			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección Simple	10
2	Tipo de regulación de tráfico	PARE	5
3	Número de giros	2 GI-TD, 2 GD-S	10
4	Ubicación de la intersección	Vía Colectora	7
5	Relación con análisis de seguridad vial	Existe registro de Auditorias en seguridad vial	10
TOTAL			42

Fuente: Elaboración Propia.

El registro de videos (ver [figura 53 a](#)) se realizó el miércoles 21 de marzo de 2018 entre las 14:30 y 15:30, desde una perspectiva que permitía registrar la totalidad de los movimientos (ver [figura 53 b](#)). Por lo que para el análisis del giro a la izquierda se tendrán en cuenta los movimientos 5 y 7, mientras que para el giro a la derecha se tendrán en cuenta los movimientos 9(1) y 9(4).

Figura 53 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 13.

Fuente: Elaboración Propia.

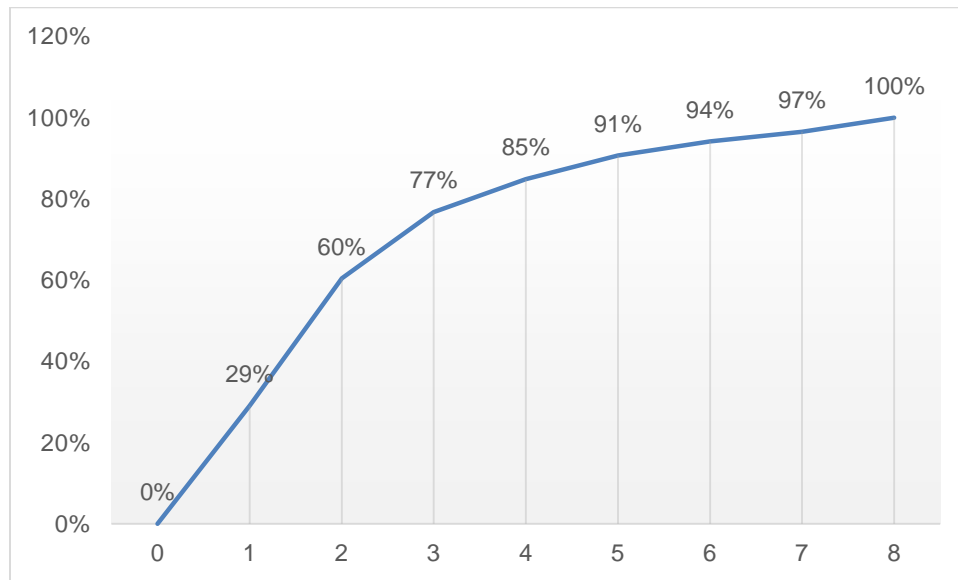
En la [tabla 35](#) y la [gráfica 21](#) se observan respectivamente el análisis por medio de tabla de frecuencia y la ojiva porcentual del giro a la izquierda para esta intersección donde se registraron 86 datos, de los cuales el 60% se encuentran agrupados en los dos primeros intervalos. La media aritmética resulta en 9,8 segundos con una desviación estándar de 2,81.

Tabla 35 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 13.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	3,00	6,12	4,56	25	25	29%	29%
2	6,13	9,25	7,69	52	27	31%	60%
3	9,26	12,38	10,82	66	14	16%	77%
4	12,39	15,51	13,95	73	7	8%	85%
5	15,52	18,64	17,08	78	5	6%	91%
6	18,65	21,77	20,21	81	3	3%	94%
7	21,78	24,9	23,34	83	2	2%	97%
8	24,91	28	26,455	86	3	3%	100%
			Total		86	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 21 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 13.



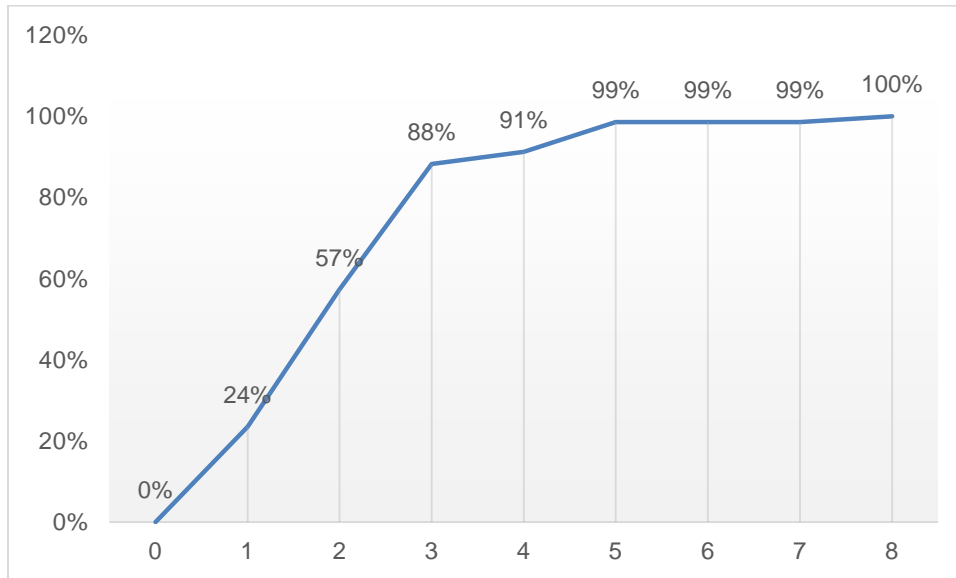
Fuente: Elaboración Propia.

El análisis de los 68 datos recabados para el giro a la derecha se encuentra en la tabla de frecuencia 36. Asimismo, en la [gráfica 22](#) se puede observar como el 88% de los datos se agrupan en los primeros tres intervalos haciendo que la media aritmética se acerque a ellos con 4,67 segundos y una desviación estándar de 1,47.

Tabla 36 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 13.

Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	2,00	3,37	2,685	16	16	24%	24%
2	3,38	4,75	4,065	39	23	34%	57%
3	4,76	6,13	5,445	60	21	31%	88%
4	6,14	7,51	6,825	62	2	3%	91%
5	7,52	8,89	8,205	67	5	7%	99%
6	8,9	10,27	9,585	67	0	0%	99%
7	10,28	11,65	10,965	67	0	0%	99%
8	11,66	13	12,33	68	1	1%	100%
			Total		68	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 22 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 13.

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.14 Intersección Vial 14

Intersección vial canalizada por señalización ubicada sobre la Avenida Santander, vía arteria principal de la ciudad de Manizales, sobre las coordenadas geográficas -75,485 de longitud oeste y 5,054 de latitud norte. Asimismo, al momento de realizar el análisis de priorización y registro de video (20/02/2018) tenía como tipo de regulación de tráfico la señal tipo PARE. Unas semanas después, la alcaldía municipal decidió instalar un semáforo con el fin de regular dicha intersección vial y mitigar los riesgos dados por los numerosos conflictos y el alto flujo vehicular. En esta investigación, se tendrá en cuenta el análisis previo a la instalación del semáforo. En cuanto al análisis de giros, posee 1 giro con conflicto con tráfico directo y 2 giros a la derecha simples. En la [figura 54 b](#) se destacan los conflictos, entre los que se cuentan dos giros a la izquierda con conflicto con tráfico directo y dos por convergencia y divergencia de flujos. Sobre esta intersección se cuentan con registros en auditorias en seguridad vial.

Figura 54 Intersección vial 14 (a). Conflictos intersección vial 14 (b).



Fuente: Figura 54(a) tomada de google street view, figura 54(b) elaboración propia.

En la [tabla 37](#) se puede observar el análisis de priorización propio para esta intersección vial.

Tabla 37 Análisis de priorización intersección vial 14.

Intersección vial 14			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección Simple	10
2	Tipo de regulación de tráfico	PARE	5
3	Número de giros	2 GI-TD, 2 GD-S	10
4	Ubicación de la intersección	Vía Colectora	7
5	Relación con análisis de seguridad vial	Existe registro de Auditorias en seguridad vial	10
TOTAL			42

Fuente: Elaboración Propia.

El registro de video, realizado el martes 20 de febrero de 2018 permitió el análisis de la totalidad del movimiento 5 de giro a la izquierda.

Figura 55 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 14.



Fuente: Elaboración Propia.

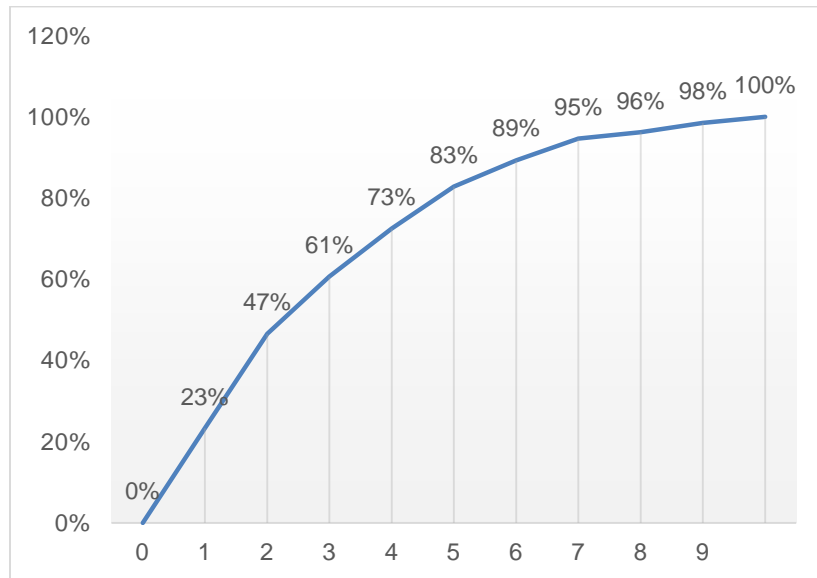
En la [tabla 38](#) se muestra el análisis mediante intervalos de frecuencia para los 262 datos recolectados en la intersección vial, pertenecientes al giro a la izquierda (movimiento 5). Entre los resultados más relevantes, se presenta la media aritmética que alcanza 23,98 segundos con una desviación estándar de 3,45. En la [gráfica 23](#) se parecía la ojiva porcentual de frecuencia relativa acumulada donde el 47% de los datos se agrupan en los dos primeros intervalos y el 73% entre los cuatro primeros, abarcando la media aritmética en este último.

Tabla 38 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 14.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	2,00	9,69	5,845	61	61	23%	23%
2	9,7	17,39	13,545	122	61	23%	47%
3	17,4	25,09	21,245	159	37	14%	61%
4	25,1	32,79	28,945	190	31	12%	73%
5	32,8	40,49	36,645	217	27	10%	83%
6	40,5	48,19	44,345	234	17	6%	89%
7	48,2	55,89	52,045	248	14	5%	95%
8	55,9	63,59	59,745	252	4	2%	96%
9	63,6	71,29	67,445	258	6	2%	98%
10	71,3	79	75,15	262	4	2%	100%
			Total		262	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 23 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 14.



Fuente: Elaboración Propia.

4.1.15 Intersección Vial 15

Esta intersección vial se encuentra ubicada sobre la vía arteria principal más importante de la ciudad, la Avenida Santander sobre las coordenadas geográficas -75,492 de longitud oeste y 5,062 de latitud norte. Posee regulación mediante semáforo y canalización por medio de señalización. En cuanto a los conflictos y giros permitidos, posee 2 conflictos entre giro a la izquierda y tráfico directo, 2 conflictos por divergencia de flujos y 2 entre peatones y vehículos. Asimismo, 1 giro a la izquierda con conflicto de tráfico directo y 1 giro a la derecha simple. Sobre este punto no se encuentran registros referentes a estudios en seguridad vial.

Figura 56 Intersección vial 15 (a). Conflictos intersección vial 15 (b).



Fuente: Elaboración Propia.

En la [tabla 39](#) se observa el análisis de priorización propio de la intersección vial 15.

Tabla 39 Análisis de priorización intersección vial 15.

Intersección vial 15			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección canalizada mediante señalización	8
2	Tipo de regulación de tráfico	Semáforo	10
3	Número de giros	1 GI-TD, 1 GD-S	8
4	Ubicación de la intersección	Vía Arteria principal	10
5	Relación con análisis de seguridad vial	No Existe registro de Auditorias en seguridad vial	5
TOTAL			41

Fuente: Elaboración Propia.

La toma de videos fue realizada el jueves 22 de febrero de 2018 entre las 13:40 y 14.40, desde una perspectiva que permitía analizar el movimiento 6 en su totalidad, correspondiente al giro a la izquierda. El movimiento 9(1), de giro a la derecha, se alcanza a observar de forma parcial por lo que no se tendrá en cuenta en el registro de datos.

Figura 57 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 15.



Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla de frecuencia 40, se observa el análisis para el giro a la izquierda en dicha intersección, donde se estudiaron 182 datos mediante 9 intervalos. En la [gráfica 24](#) de

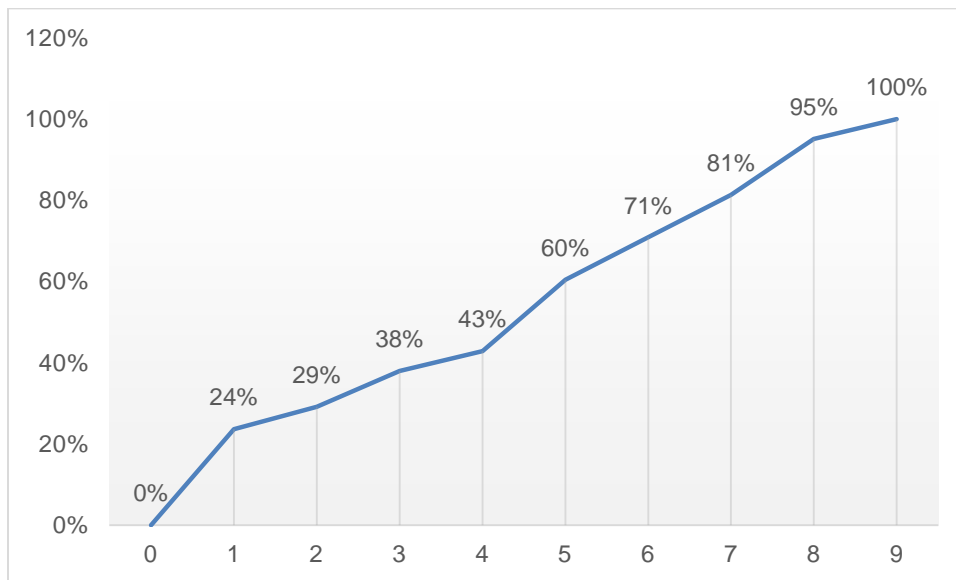
ojiva porcentual, se puede ver una distribución casi uniforme debido a que se sobrepasa el 50% de agrupación de datos en el intervalo de frecuencia 6. Por lo tanto, la media aritmética resulta en 38,49 segundos con una desviación estándar de 4,07.

Tabla 40 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 15.

Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	4,00	12,43	8,215	42	42	23%	23%
2	12,44	20,87	16,655	52	10	6%	29%
3	20,88	29,31	25,095	68	16	9%	38%
4	29,32	37,75	33,535	77	9	5%	43%
5	37,76	46,19	41,975	109	32	18%	60%
6	46,2	54,63	50,415	128	19	10%	71%
7	54,64	63,07	58,855	147	19	10%	81%
8	63,08	71,51	67,295	172	25	14%	95%
9	71,52	80	75,76	181	9	5%	100%
			Total		181	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 24 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 15.



Fuente: Elaboración Propia.

4.1.16 Intersección Vial 16

Intersección vial ubicada sobre la avenida Santander, vía arteria principal de la ciudad, sobre las coordenadas geográficas -75,498 de longitud oeste y 5,064 de latitud. Posee regulación de tráfico mediante semáforo y canalización del tráfico mediante infraestructura. En lo relacionado con los conflictos posee 1 entre giros a la izquierda, 3 por convergencia de flujos y 2 por divergencia de flujos, así como 4 entre giro a la izquierda y tráfico directo. Se cuentan con dos pasos peatonales que generan 8 conflictos entre peatones y vehículos. Para el análisis, se pueden contar con 2 giros a la derecha simples y 2 giros a la izquierda con conflicto con tráfico directo. Por último, no se registran estudios previos relacionados con seguridad vial.

Figura 58 Intersección vial 16 (a). Conflictos intersección vial 16 (b).



Fuente: Elaboración Propia.

En la [tabla 41](#) se puede apreciar el resumen del análisis de priorización hecho para esta intersección vial.

Tabla 41 Análisis de priorización intersección vial 16.

Intersección vial 16			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección canalizada mediante infraestructura	7
2	Tipo de regulación de tráfico	Semáforo	10
3	Número de giros	2 GI-TD, 2 GD-S	10
4	Ubicación de la intersección	Vía Arteria principal	10

5	Relación con análisis de seguridad vial	No Existe registro de Auditorias en seguridad vial	5
		TOTAL	42

Fuente: Elaboración Propia.

El miércoles 14 de marzo entre las 16.15 y 17:15 se realizó el registro de video para esta intersección, desde una perspectiva elevada (ver [figura 59 a](#)) que permitió analizar los movimientos 5 de giro a la izquierda, y movimiento 9(1) de giro a la derecha (ver [figura 59 b](#)).

Figura 59 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 16.



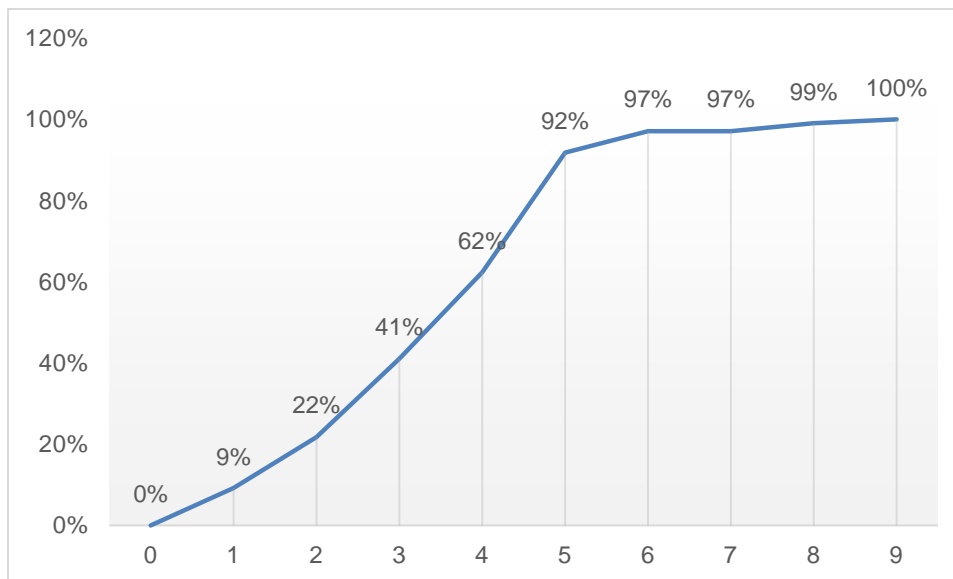
Fuente: Elaboración Propia.

El análisis de giro a la izquierda mediante tabla de frecuencia se puede observar en la [tabla 42](#), donde se agrupan los 207 tiempos registrados en 9 intervalos de clase. En la gráfica de ojiva porcentual (ver [gráfica 25](#)) se observa como el 92% de los datos se agrupan en los primeros 5 intervalos y tan solo el 8% restante se reparte en los siguientes 4 intervalos. Asimismo, hay un amplio rango entre el dato menor (3 segundos) y mayor (185 segundos), lo que se explica por los ciclos del semáforo y la amplia cola de espera que se puede generar cuando el flujo de vehículos es alto, haciendo que el tiempo de espera sea de hasta dos fases antes de poder realizar la maniobra de giro, mientras que en el caso de los datos más bajos, presentes en el primer intervalo, se dan en el momento en que no existe cola en la intersección y fase verde en el semáforo lo que les permite atravesar la intersección sin ningún tipo de restricciones. La media aritmética alcanza 70,13 segundos con una desviación estándar de 9,55 segundos.

Tabla 42 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 16.

Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	3,00	23,21	13,105	18	18	9%	9%
2	23,22	43,43	33,325	44	26	13%	21%
3	43,44	63,65	53,545	84	40	19%	41%
4	63,66	83,87	73,765	128	44	21%	62%
5	83,88	104,09	93,985	189	61	30%	92%
6	104,1	124,31	114,205	200	11	5%	97%
7	124,32	144,53	134,425	200	0	0%	97%
8	144,54	164,75	154,645	204	4	2%	99%
9	164,76	185	174,88	206	2	1%	100%
			Total		206	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 25 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 16.

Fuente: Elaboración Propia.

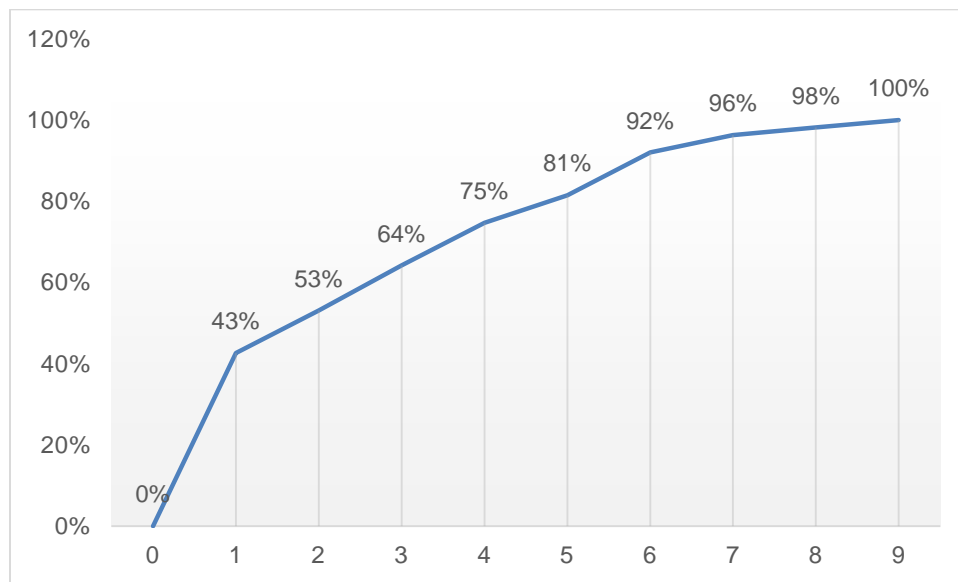
En el caso del giro a la derecha, se obtuvieron 163 datos, analizados en la [tabla 43](#). En este caso se agrupan el 43% de los datos en el primer intervalo, porcentaje que crece hasta 92% entre el segundo y sexto intervalo, lo que nos indica un crecimiento casi uniforme entre estos intervalos. En este caso, la media aritmética alcanza 30.04 segundos con una desviación estándar de 6,95.

Tabla 43 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 16.

Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	2,00	13,32	7,66	69	69	43%	43%
2	13,33	24,65	18,99	86	17	10%	53%
3	24,66	35,98	30,32	104	18	11%	64%
4	35,99	47,31	41,65	121	17	10%	75%
5	47,32	58,64	52,98	132	11	7%	81%
6	58,65	69,97	64,31	149	17	10%	92%
7	69,98	81,3	75,64	156	7	4%	96%
8	81,31	92,63	86,97	159	3	2%	98%
9	92,64	104	98,32	162	3	2%	100%
			Total		162	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 26 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 16.



Fuente: Elaboración Propia.

4.1.17 Intersección Vial 17

Esta intersección vial, canalizada mediante señalización, se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas -75,946 de longitud oeste y 5,061 de latitud norte sobre una vía arteria principal de la ciudad de Manizales, la Avenida Paralela. Cuenta con uso del suelo mixto alrededor entre los que se cuentan instituciones educativas, de culto y del estado, así como comercio y vivienda. Además, está regulada mediante semáforo y posee

múltiples conflictos (ver [figura 60 b](#)) debido a que tiene 2 giros a la izquierda con conflicto de tráfico directo y 3 giros a la derecha simples. Sobre este punto no se tienen registros de análisis en seguridad vial.

Figura 60 Intersección vial 17 (a). Conflictos intersección vial 17 (b).



Fuente: Elaboración Propia.

En la [tabla 44](#) se presenta el resultado de priorización para la intersección vial 17.

Tabla 44 Análisis de priorización intersección vial 17.

Intersección vial 17			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección canalizada mediante señalización	8
2	Tipo de regulación de tráfico	Semáforo	10
3	Número de giros	2 GI-TD, 3 GD-S	10
4	Ubicación de la intersección	Vía Arteria principal	10
5	Relación con análisis de seguridad vial	No Existe registro de Auditorias en seguridad vial	5
TOTAL			43

Fuente: Elaboración Propia.

El jueves 22 de febrero de 2018 se realizó la toma de video para esta intersección (ver [figura 61 a](#)), desde una perspectiva que permitía analizar el movimiento 6, de giro a la izquierda y movimiento 9(2), giro a la derecha, ambas en su totalidad.

Figura 61 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 17.



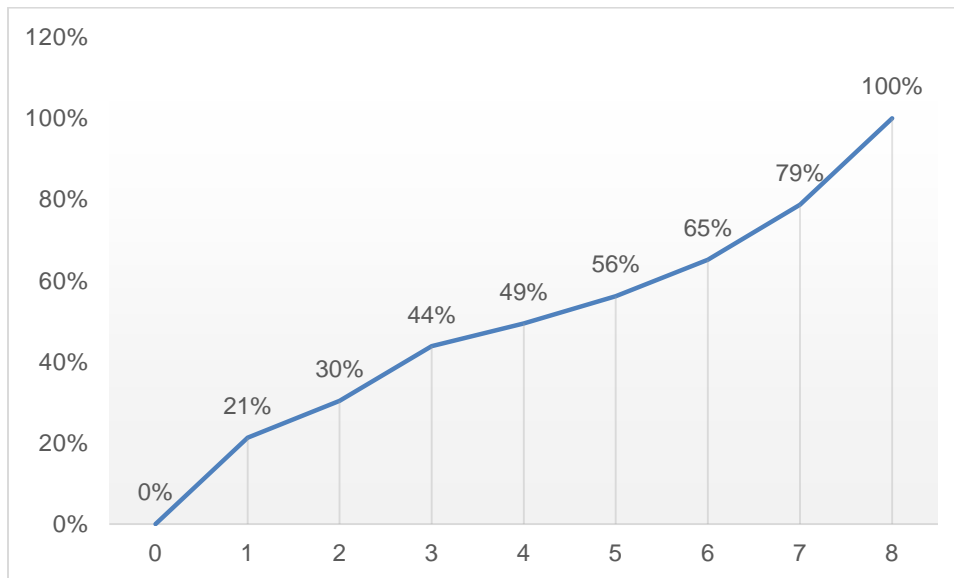
Fuente: Elaboración Propia.

El movimiento 6, que corresponde al análisis de giro a la izquierda, obtuvo 90 tiempos de giro los cuales se distribuyen de una manera equilibrada en los 8 intervalos de frecuencia, alcanzando 51,10 segundos y 8,04 de media aritmética y desviación estándar, respectivamente.

Tabla 45 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 17.

Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	4,00	15,62	9,81	19	19	21%	21%
2	15,63	27,25	21,44	27	8	9%	30%
3	27,26	38,88	33,07	39	12	13%	44%
4	38,89	50,51	44,7	44	5	6%	49%
5	50,52	62,14	56,33	50	6	7%	56%
6	62,15	73,77	67,96	58	8	9%	65%
7	73,78	85,4	79,59	70	12	13%	79%
8	85,41	97	91,205	89	19	21%	100%
			Total		89	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 27 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 17.

Fuente: Elaboración Propia.

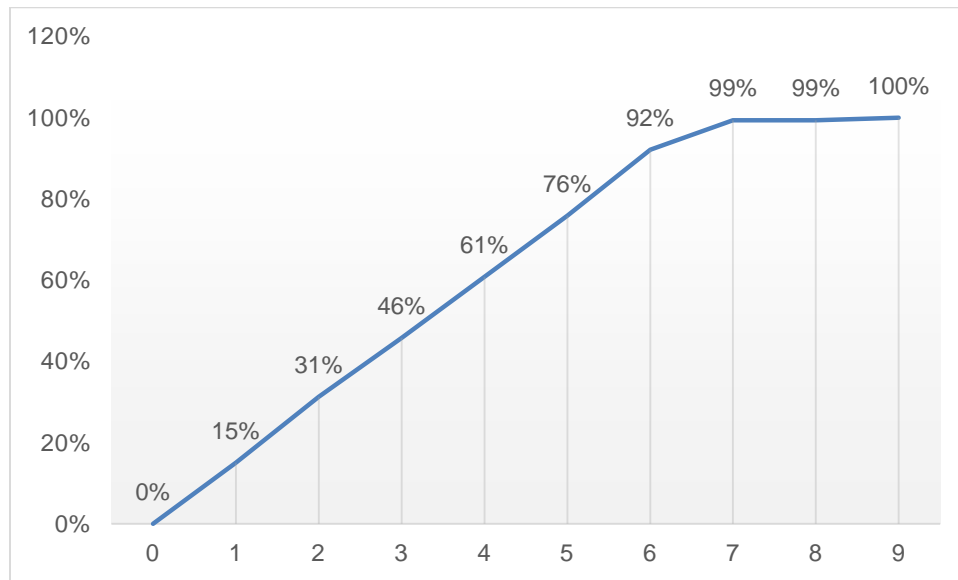
En cuanto al giro a la derecha, representado por los 166 datos del movimiento 9(2), su media aritmética resultó en 52,88 segundos con una desviación estándar de 7,97. En la [gráfica 28](#), de ojiva porcentual se observa un comportamiento uniforme en la distribución de los datos entre el intervalo 1 y 6 hasta donde se alcanza el 92% de agrupamiento.

Tabla 46 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 17.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	3,00	18,1	10,55	25	25	15%	15%
2	18,11	33,21	25,66	52	27	16%	31%
3	33,22	48,32	40,77	76	24	14%	46%
4	48,33	63,43	55,88	101	25	15%	61%
5	63,44	78,54	70,99	126	25	15%	76%
6	78,55	93,65	86,1	153	27	16%	92%
7	93,66	108,76	101,21	165	12	7%	99%
8	108,77	123,87	116,32	165	0	0%	99%
9	123,88	139	131,44	166	1	1%	100%
			Total		166	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 28 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 17.



Fuente: Elaboración Propia.

4.1.18 Intersección Vial 18

Intersección vial ubicada en la Avenida Gilberto Álzate, vía arteria principal de la ciudad de Manizales, sobre las coordenadas geográficas -75,516 de longitud oeste y 5,070 de latitud norte. Por está, transitan numerosas rutas de transporte público y es una de las pocas avenidas de la ciudad que cuenta con 3 carriles por sentido. Entre sus principales características se cuentan que está canalizada mediante señalización, regulada por semáforo y posee 1 giro a la izquierda con conflicto con tráfico directo y dos giros a la derecha simples, por lo que entre sus conflictos se enumeran 8 entre tráfico directo, 2 entre giro a la izquierda y tráfico directo, 3 de divergencia y convergencia de flujos. Entre los registros no se cuentan con análisis de seguridad vial para la intersección vial.

Figura 62 Intersección vial 18 (a). Conflictos intersección vial 18 (b).



Fuente: Elaboración Propia.

El análisis de priorización de la intersección vial 18 se observa en la [tabla 47](#).

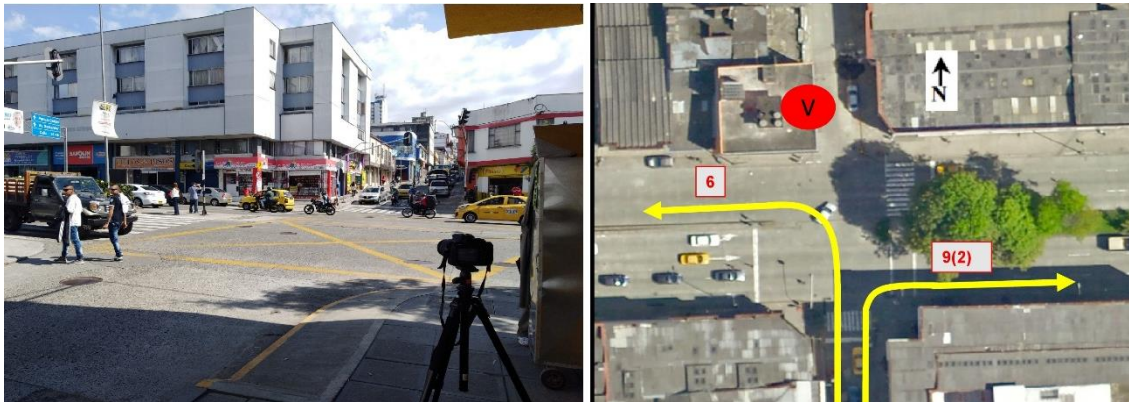
Tabla 47 Análisis de priorización intersección vial 18.

Intersección vial 18			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección canalizada mediante señalización	8
2	Tipo de regulación de tráfico	Semáforo	10
3	Número de giros	2 GI-TD, 3 GD-S	10
4	Ubicación de la intersección	Vía Arteria principal	10
5	Relación con análisis de seguridad vial	No Existe registro de Auditorias en seguridad vial	5
TOTAL			43

Fuente: Elaboración Propia.

El registro de video ([figura 63 a](#)) se realizó el miércoles 7 de marzo de 2018 entre las 14.40 y 15:40 desde una perspectiva que permitió el análisis de los movimientos 6 y 9(2) (ver [figura 63 b](#)) que corresponden al giro a izquierda y derecha respectivamente

Figura 63 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 18.



Fuente: Elaboración Propia.

La tabla de frecuencia para el giro a la izquierda presenta un total de 131 datos de los cuales, el 47% se agrupa entre los primeros 6 intervalos por lo que el 53% lo hace en los

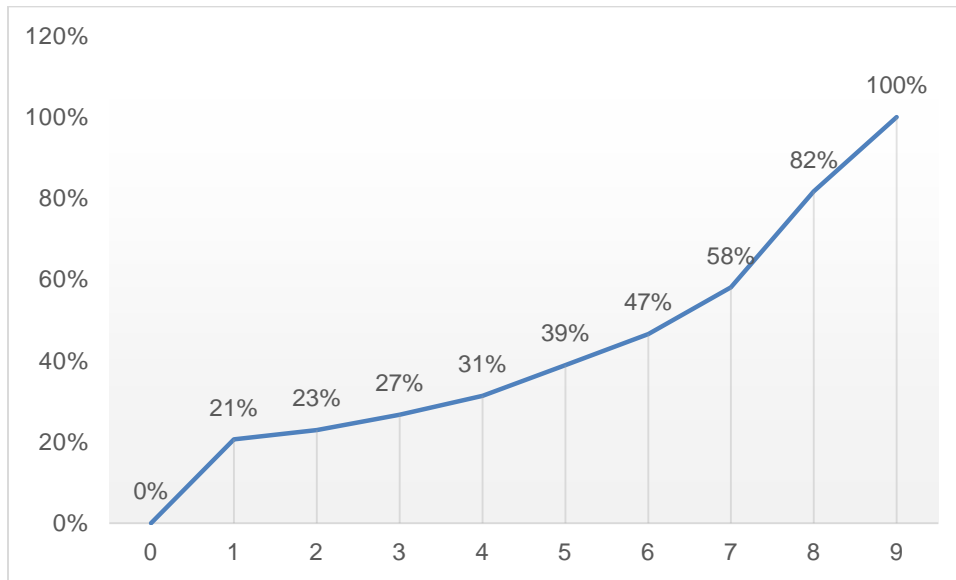
intervalos 7 a 9 lo que indica que la media aritmética y desviación estándar estarán cercanos a estos intervalos. La media aritmética alcanza 37,32 segundos, mientras que la desviación estándar 4,23.

Tabla 48 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 18.

Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	3,00	9,55	6,275	27	27	21%	21%
2	9,56	16,11	12,835	30	3	2%	23%
3	16,12	22,67	19,395	35	5	4%	27%
4	22,68	29,23	25,955	41	6	5%	31%
5	29,24	35,79	32,515	51	10	8%	39%
6	35,8	42,35	39,075	61	10	8%	47%
7	42,36	48,91	45,635	76	15	11%	58%
8	48,92	55,47	52,195	107	31	24%	82%
9	55,48	62	58,74	131	24	18%	100%
			Total		131	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 29 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 18.



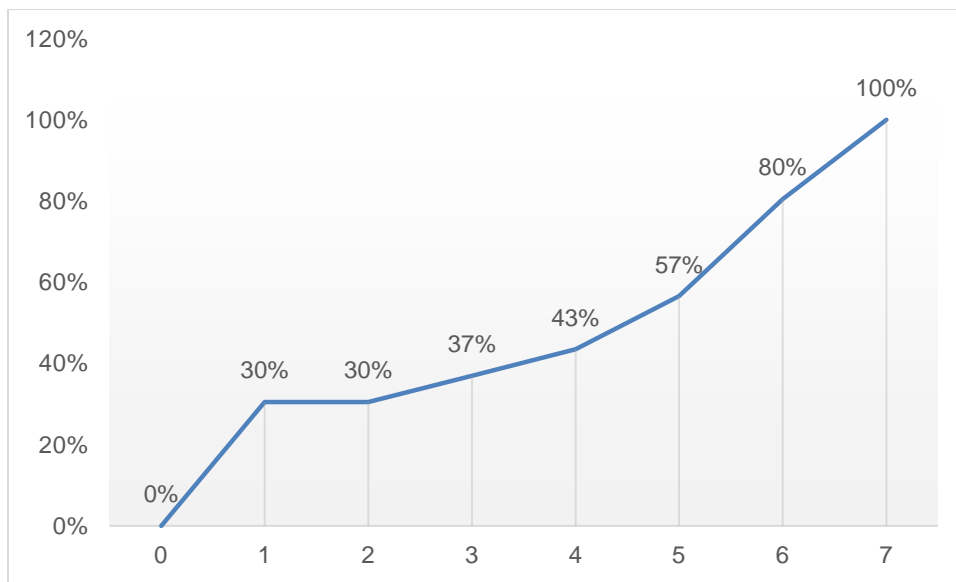
Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado, el análisis de giro a la derecha, presente en la [tabla 49](#), nos muestra cómo se registraron un total de 46 datos agrupados en 7 intervalos de clase. La media aritmética resultó en 35,38 segundos y la desviación estándar en 6,9.

Tabla 49 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 18.

Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	3,00	11,7	7,35	14	14	30%	30%
2	11,71	20,41	16,06	14	0	0%	30%
3	20,42	29,12	24,77	17	3	7%	37%
4	29,13	37,83	33,48	20	3	7%	43%
5	37,84	46,54	42,19	26	6	13%	57%
6	46,55	55,25	50,9	37	11	24%	80%
7	55,26	64	59,63	46	9	20%	100%
			Total		46	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 30 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 18.

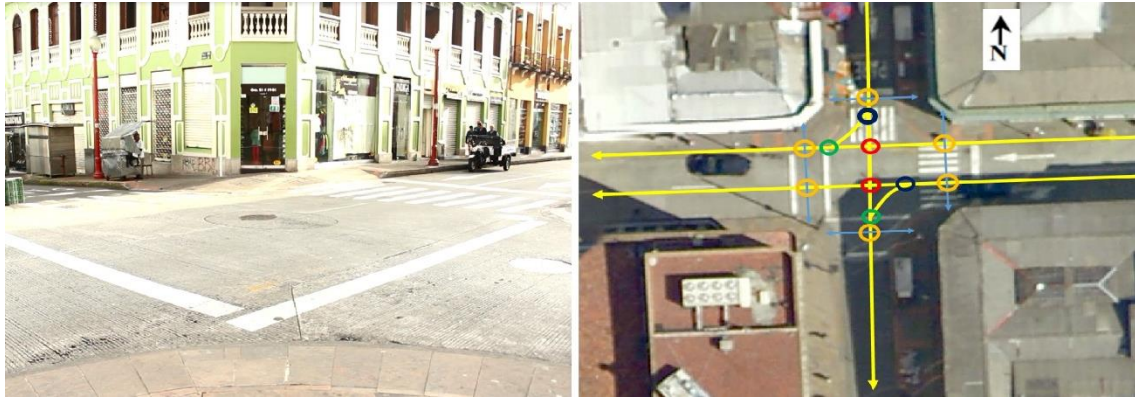
Fuente: Elaboración Propia.

4.1.19 Intersección Vial 19

Es una intersección simple, regulada por señalización de PARE. Asimismo, conecta la ciudad en sentido este-oeste permitiendo la entrada al centro histórico del volumen que procede del oriente de la ciudad. Por otro lado, en el sentido norte-sur se percibe alto flujo vehicular ya que conduce al edificio de la Alcaldía de Manizales, un gran atractor de viajes, sobretodo en horas pico. No se registra paso de transporte público porque no es permitida su entrada al centro histórico excepto en contadas excepciones y para vehículos que cuenten con energías limpias entre su combustible. Ubicada sobre una vía arteria

secundaria en la coordenadas geográficas -75,520 de longitud oeste y 5,068 de latitud norte, entre sus giros cuenta con un giro a la derecha y un giro a la izquierda simple. No registra auditorias en seguridad vial.

Figura 64 Intersección vial 19 (a). Conflictos intersección vial 19 (b).



Fuente: Elaboración Propia.

En la [tabla 50](#) se observa el resumen del análisis de priorización dado para esta intersección vial.

Tabla 50 Análisis de priorización intersección vial 19.

Intersección vial 19			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección simple	10
2	Tipo de regulación de tráfico	PARE	5
3	Número de giros	1 GI-TS, 1 GD-S	6
4	Ubicación de la intersección	Vía Arteria Secundaria	8
5	Relación con análisis de seguridad vial	No Existe registro de Auditorias en seguridad vial	5
TOTAL			34

Fuente: Elaboración Propia.

El movimiento 8 de giro a la izquierda y el movimiento 9(1) de giro a la derecha, fueron los registrados mediante la grabación de video realizada el miércoles 28 de marzo de 2018 entre las 7:50 y 8:50.

Figura 65 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 19.

Fuente: Elaboración Propia.

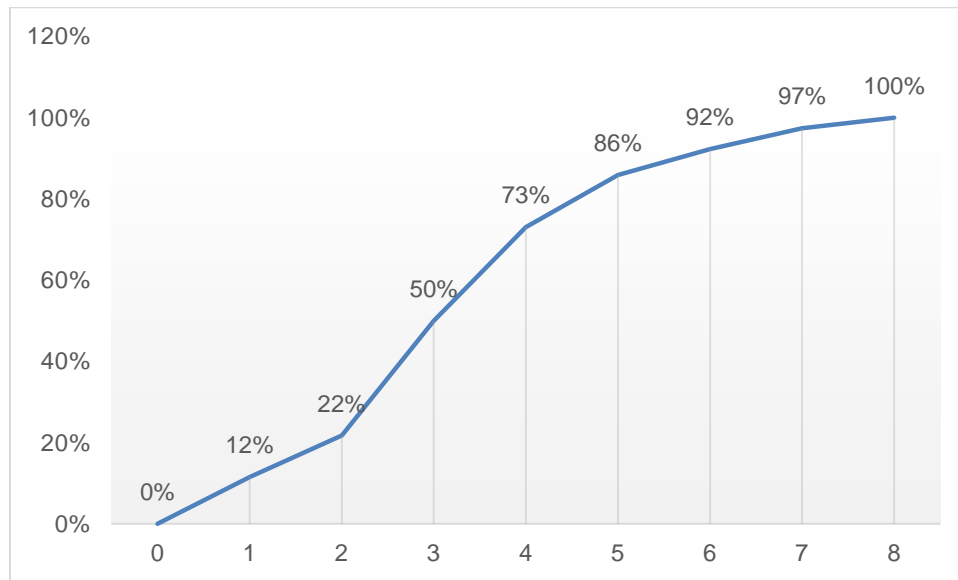
En el análisis de giro a la izquierda se registraron 78 tiempos de donde se obtiene una media aritmética de 3,21 segundos con una desviación estándar de 0,61.

Tabla 51 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 19.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
							0%
1	0,73	1,5	1,115	9	9	12%	12%
2	1,51	2,28	1,895	17	8	10%	22%
3	2,29	3,06	2,675	39	22	28%	50%
4	3,07	3,84	3,455	57	18	23%	73%
5	3,85	4,62	4,235	67	10	13%	86%
6	4,63	5,4	5,015	72	5	6%	92%
7	5,41	6,18	5,795	76	4	5%	97%
8	6,19	7	6,595	78	2	3%	100%
			Total		78	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 31 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 19.



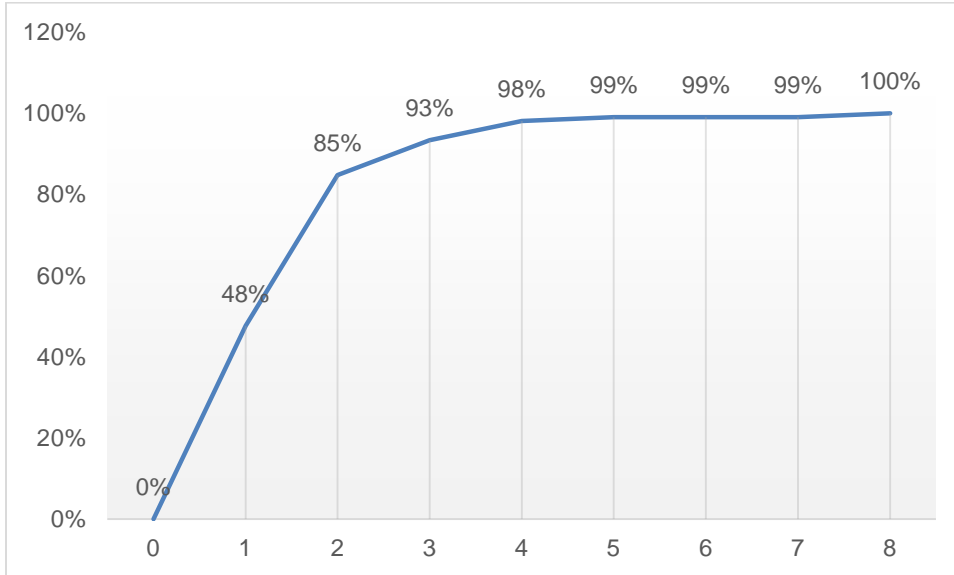
Fuente: Elaboración Propia.

En el análisis de giro a la derecha se registraron 103 tiempos de donde se obtiene una media aritmética de 7,04 segundos con una desviación estándar de 4,01.

Tabla 52 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 19.

Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	1,79	5,85	3,82	50	50	48%	48%
2	5,86	9,92	7,89	89	39	37%	85%
3	9,93	13,99	11,96	98	9	9%	93%
4	14	18,06	16,03	103	5	5%	98%
5	18,07	22,13	20,1	104	1	1%	99%
6	22,14	26,2	24,17	104	0	0%	99%
7	26,21	30,27	28,24	104	0	0%	99%
8	30,28	34,36	32,32	105	1	1%	100%
			Total		105	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 32 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 19.

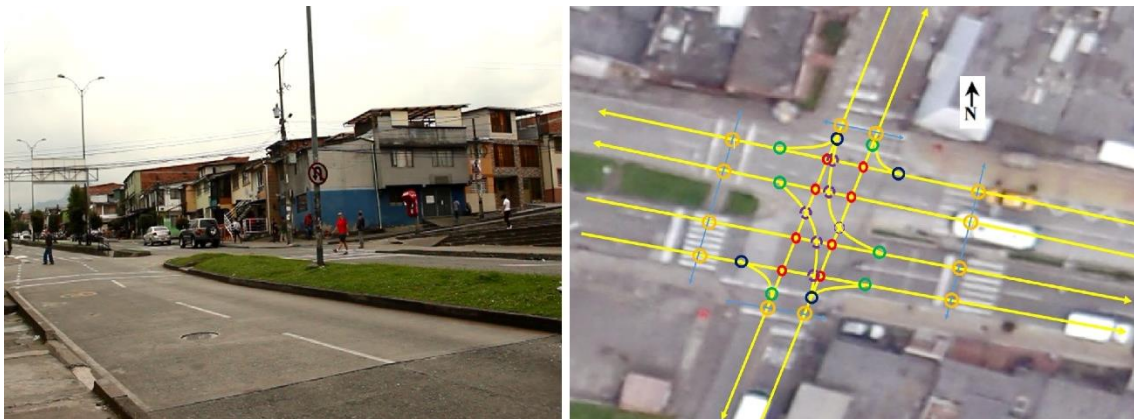
Fuente: Elaboración Propia.

Esta intersección vial, al tener un flujo moderado y solo tener regulación mediante señalización de PARE, los tiempos de espera son mínimos antes de realizar la maniobra por lo que los tiempos de giro para ambos movimientos son bajos.

4.1.20 Intersección Vial 20

Esta intersección vial se encuentra ubicada en el barrio la Enea, uno de los más grandes de la ciudad, sobre su avenida principal en las coordenadas -75,467 de longitud oeste y 5,032 de latitud norte. Aunque está ubicada sobre la avenida principal de entrada y salida del barrio, en el subsistema de jerarquización vial está clasificada como colectora, debido a que su flujo durante todo el día es moderado. Asimismo, diversas rutas de transporte público la atraviesan por lo que existe un flujo considerable de vehículos pesados. Por otro lado, existen muchos giros permitidos, 2 giros a la izquierda con conflicto de tráfico directo y 4 giros a la derecha simple, así como múltiples conflictos entre los diferentes flujos. Como método de canalización posee señalización y señal de PARE como regulación del tráfico. Por último, no existen registros de auditorías en seguridad vial.

Figura 66 Intersección vial 20 (a). Conflictos intersección vial 20 (b).



Fuente: Elaboración Propia.

En la [tabla 53](#) se puede apreciar el análisis de priorización realizado para la intersección vial 20.

Tabla 53 Análisis de priorización intersección vial 20.

Intersección vial 20			
Variable	Tipo	Clasificación	Calificación
1	Canalización de tráfico	Intersección canalizada por señalización	8
2	Tipo de regulación de tráfico	PARE	5
3	Número de giros	2 GI-TD, 4 GD-S	10
4	Ubicación de la intersección	Vía Colectora	7
5	Relación con análisis de seguridad vial	No Existe registro de Auditorias en seguridad vial	5
TOTAL			35

Fuente: Elaboración Propia.

Entre los movimientos analizados gracias a los videos tomados el viernes 16 de marzo de 2018 entre las 11:15 y 12.15 se cuentan los presentes en la [figura 67 b](#), dos de giro a la izquierda (movimientos 6 y 8) y dos de giro a la derecha (movimientos 9(2) y 9(4)).

Figura 67 Toma de video (a). Nombre de movimientos (b), intersección vial 20.

Fuente: Elaboración Propia.

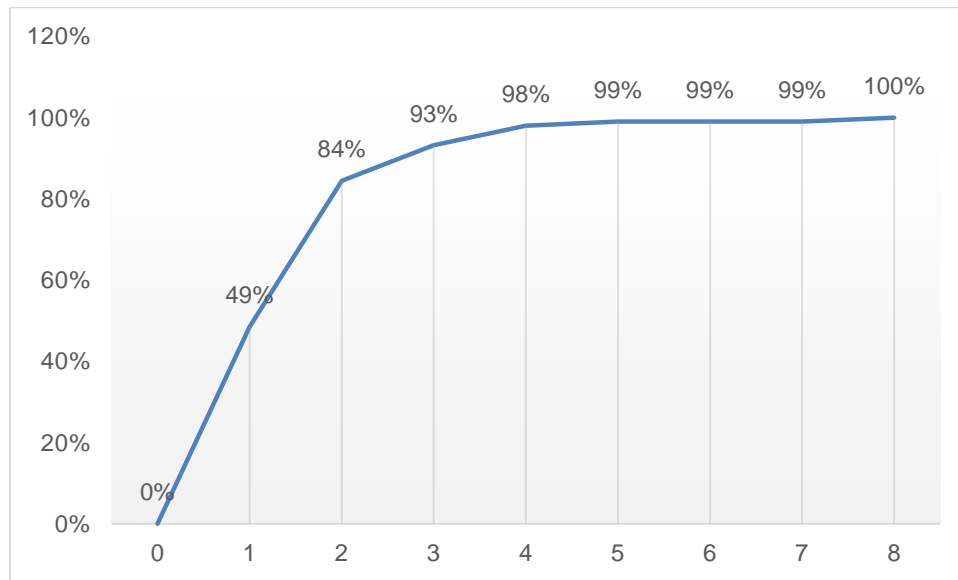
En la [tabla 54](#), se puede observar el análisis realizado al giro a la izquierda mediante tabla de frecuencias, donde se registraron 81 tiempos repartidos en 8 intervalos de clase. Entre estos, el 84% de los datos se agrupa en los primeros 3 intervalos lo que hace que las medidas de tendencia central sean atraídas hacia estos datos. Por lo tanto, la media aritmética resulta en 13,58 segundos con una desviación estándar de 5,82.

Tabla 54 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersección vial 20.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	5,00	10,49	7,745	42	42	52%	52%
2	10,5	15,99	13,245	59	17	21%	73%
3	16	21,49	18,745	68	9	11%	84%
4	21,5	26,99	24,245	74	6	7%	91%
5	27	32,49	29,745	78	4	5%	96%
6	32,5	37,99	35,245	80	2	2%	99%
7	38	43,49	40,745	80	0	0%	99%
8	43,5	49	46,25	81	1	1%	100%
			Total		81	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 33 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersección vial 20.



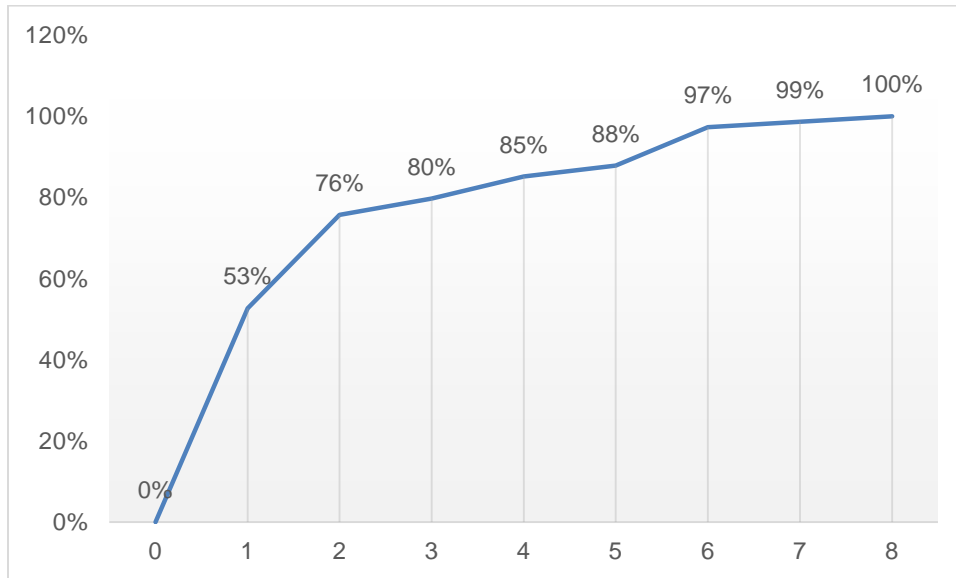
Fuente: Elaboración Propia.

Por otra parte, en la [tabla 55](#) y la [gráfica 34](#) se observan el análisis mediante tabla de frecuencia y ojiva porcentual para los 74 datos recolectados para el giro a la derecha. En estos, se observa como más de la mitad de los datos (53%) se agrupan en el primer intervalo. La media aritmética resulta en 11,14 segundos con una desviación estándar de 4,05.

Tabla 55 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersección vial 20.

Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	4,00	8,12	6,06	39	39	53%	53%
2	8,13	12,25	10,19	56	17	23%	76%
3	12,26	16,38	14,32	59	3	4%	80%
4	16,39	20,51	18,45	63	4	5%	85%
5	20,52	24,64	22,58	65	2	3%	88%
6	24,65	28,77	26,71	72	7	9%	97%
7	28,78	32,9	30,84	73	1	1%	99%
8	32,91	37	34,955	74	1	1%	100%
			Total		74	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 34 Ojiva porcentual giro a la derecha, intersección vial 20.

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.21 Resumen de resultados de cada intersección vial

En la [tabla 56](#) se observa el resumen de resultados obtenidos de media aritmética, desviación estándar y número de datos registrados por cada intersección vial en los giros analizados. En primer lugar, para las 20 intersecciones viales analizadas se pudieron obtener registros referentes al giro a la izquierda mientras que en 5 de las intersecciones viales (Intersecciones viales 3, 8, 9, 14 y 15) no se pudieron analizar giros a la derecha debido a la perspectiva captada al momento de realizar el video.

Entre los 2637 tiempos de giro a la izquierda observados en los análisis de video repartidos en las 20 intersecciones viales, la [intersección vial 16](#) obtuvo la media aritmética más alta, con 70,13 segundos, en gran medida al tipo de regulación de tráfico y a las largas colas de espera que se formaron en el momento de realizar la toma de video debido al alto flujo vehicular. Por otra parte, la [intersección vial 19](#) obtuvo el dato menor de media aritmética para los análisis de giro a la izquierda con 3,21 segundos, debido al tipo de intersección y regulación de tráfico, así como por el bajo flujo vehicular observado al momento de realizar la toma de videos.

En cuanto al análisis de giro a la derecha, que alcanzaron un registro total de 1557 tiempos. La [intersección vial 4](#) obtuvo el registro más alto de media aritmética con 65,27 segundos, explicado por la regulación semafórica en la intersección y las largas colas de espera y alto flujo vehicular. Mientras que el dato menor, 3,56 segundos, fue obtenido para la [intersección vial 2](#), la cual posee regulación mediante señalización de PARE.

Por lo que se refiere a la dispersión de los datos, analizados a través de la desviación estándar, existen unas intersecciones viales que alcanzan valores a destacar en este sentido donde la desviación estándar se acerca mucho al valor de la media aritmética. Entre estos casos, se puede destacar el análisis de giro a la izquierda para la [intersección vial 2](#) donde hay tan solo 0,33 de diferencia entre la media aritmética y la desviación estándar, indicando una alta dispersión en los valores registrados. Cabe resaltar que esta intersección vial fue donde menos datos se pudieron observar para dicho movimiento (31) por lo que un indicativo de calidad para la metodología es el número de datos registrados. Por otra parte, para el análisis de giro a la derecha, la [intersección vial 12](#) cuenta con una diferencia entre media aritmética y desviación estándar de 0.63 con tan solo 23 datos registrados.

Tabla 56 Resumen de resultados, media aritmética, desviación estándar y número de datos registrados.

Intersección Vial	Tiempos en segundos					
	Giro Izquierda			Giro derecha		
	Media Aritmética	Desviación Estándar	# Datos	Media Aritmética	Desviación Estándar	# Datos
1	35,24	12,40	295,00	23,62	5,09	124,00
2	11,63	11,30	31,00	3,56	1,90	164,00
3	37,31	11,80	126,00	N/A	N/A	N/A
4	50,46	10,08	135,00	65,27	6,10	219,00
5	6,40	5,04	68,00	8,82	5,60	143,00
6	6,81	1,75	36,00	6,35	1,30	30,00
7	42,67	6,31	202,00	51,89	5,77	143,00
8	49,05	4,95	171,00	N/A	N/A	N/A
9	50,92	12,78	89,00	N/A	N/A	N/A
10	11,26	3,98	145,00	4,74	1,12	58,00
11	35,68	3,90	148,00	31,43	12,09	32,00
12	4,67	1,99	77,00	3,87	3,24	23,00
13	9,80	2,81	86,00	4,67	1,47	68,00
14	23,98	3,45	262,00	N/A	N/A	N/A
15	38,49	4,07	181,00	N/A	N/A	N/A
16	70,13	9,55	206,00	30,04	6,95	162,00
17	51,10	8,04	89,00	52,88	7,97	166,00
18	37,32	4,23	131,00	35,38	6,90	46,00
19	3,21	0,61	78,00	7,04	4,01	105,00
20	13,58	5,82	81,00	11,14	4,41	74,00

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Cálculo de penalidades por giro

Para el cálculo de las penalidades por giro globales para la ciudad de Manizales, se llevarán a cabo diversos análisis gracias a los datos recolectados mediante el registro de videos. En primer lugar, se calcularán las penalidades por giro globales a izquierda y derecha agrupando los tiempos de giro de todas las intersecciones viales analizadas. En segunda instancia, se agruparán los tiempos de giro a izquierda y derecha de cada intersección dividiéndolas según el criterio de regulación de tráfico, el cual resulto el factor que más hacia fluctuar los tiempos de giro en las intersecciones viales.

4.2.1 Análisis general de giro a la izquierda

En este análisis se decidieron agrupar todos los tiempos a la izquierda registrados en las 20 intersecciones viales analizadas, obteniendo un total de 2637 tiempos. Con estos, se hizo un análisis mediante tabla de frecuencia, el cual se puede observar en la [tabla 57](#), donde se aprecia cómo se agrupan los datos en 13 intervalos de clase. El valor mínimo registrado fue de 1 segundo mientras el máximo fue de 185 segundos.

Tabla 57 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, análisis general.

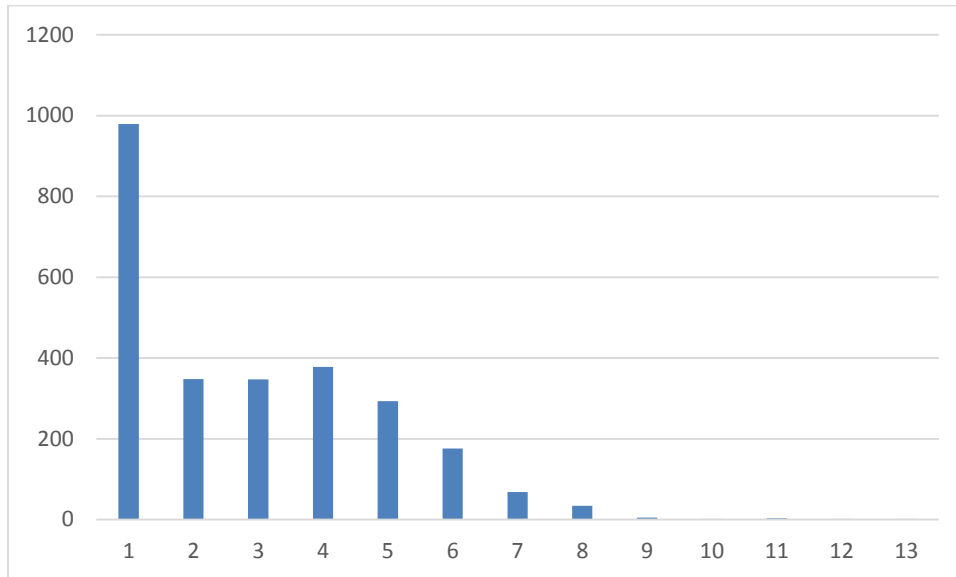
Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	1,00	15,14	8,07	979	979	37,13%	37,13%
2	15,15	29,29	22,22	1327	348	13,20%	50,32%
3	29,3	43,44	36,37	1674	347	13,16%	63,48%
4	43,45	57,59	50,52	2052	378	14,33%	77,82%
5	57,6	71,74	64,67	2345	293	11,11%	88,93%
6	71,75	85,89	78,82	2521	176	6,67%	95,60%
7	85,9	100,04	92,97	2589	68	2,58%	98,18%
8	100,05	114,19	107,12	2623	34	1,29%	99,47%
9	114,2	128,34	121,27	2628	5	0,19%	99,66%
10	128,35	142,49	135,42	2630	2	0,08%	99,73%
11	142,5	156,64	149,57	2633	3	0,11%	99,85%
12	156,65	170,79	163,72	2635	2	0,08%	99,92%
13	170,8	185	177,9	2637	2	0,08%	100,00%
			Total		2637	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

En el histograma de frecuencia absoluta de cada intervalo (ver [gráfica 35](#)) se observa la tendencia que poseen los datos, agrupándose la mayoría de estos en el primero intervalo de clase (1,00 – 15,14 segundos), otro gran porcentaje de datos se reparte de manera casi uniforme entre los siguientes 4 intervalos de clase. Por último, entre el intervalo de clase 6

y 8 se reparte otro porcentaje considerable de datos mientras que en los últimos 5 intervalos de clase se agrupa menos del 1% de los datos.

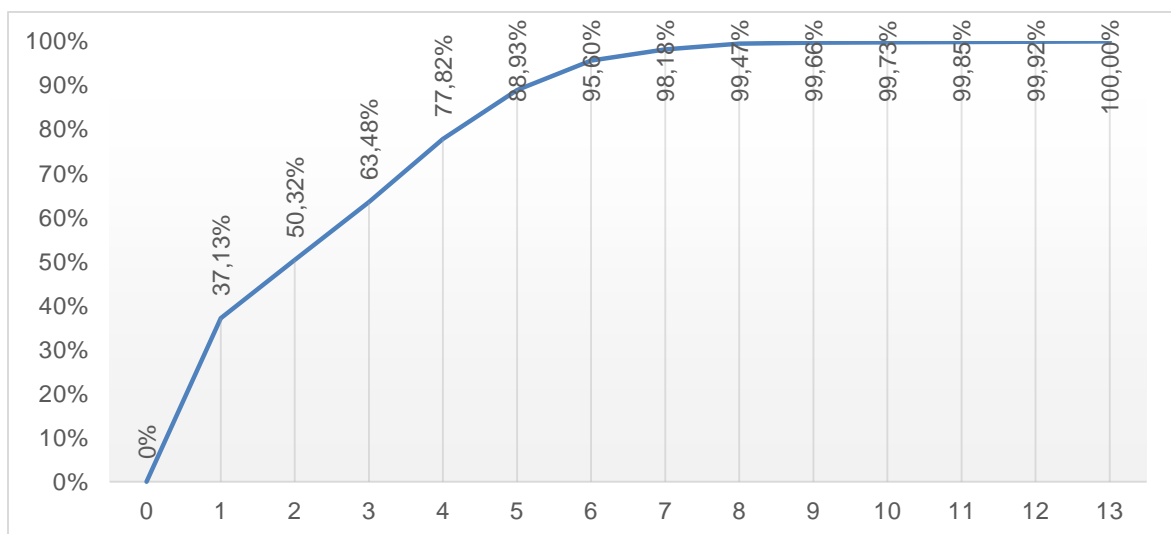
Gráfica 35 Histograma tiempos de giro a la izquierda, análisis general.



Fuente: Elaboración Propia

El comportamiento observado en el histograma anterior se puede comprobar gracias a la gráfica de ojiva porcentual de la [gráfica 36](#) donde el 37,13% de los datos se agrupan en el primer intervalo de clase. Además, se puede ver el crecimiento descrito entre los intervalos de clase 2 y 5.

Gráfica 36 Ojiva porcentual tiempos de giro a la izquierda, general.



Fuente: Elaboración Propia.

Por último, la media aritmética alcanza 34,94 segundos, ubicándose en el tercer intervalo de clase. La desviación estándar resultó en 5,51 por lo que los datos no poseen una alta dispersión, aunque el rango entre el dato mínimo y máximo haya sido de 184 segundos, lo cual fue mitigado por el alto número de datos recolectados. Este tiempo de giro a la izquierda alcanza 29,89 segundos si se calcula haciendo un promedio entre las medias aritméticas de las intersecciones viales analizadas, resultado a toda vista dispar al encontrado mediante el análisis estadístico realizado con la totalidad de los datos obtenidos.

4.2.2 Análisis general de giro a la derecha

En este análisis se decidieron agrupar todos los tiempos a la derecha registrados en las 15 intersecciones viales analizadas, obteniendo un total de 1557 tiempos. Con estos, se hizo un análisis mediante tabla de frecuencia, el cual se puede observar en la [tabla 58](#), donde se aprecia cómo se agrupan los datos en 12 intervalos de clase. El valor mínimo registrado fue de 1 segundo mientras el máximo fue de 139 segundos.

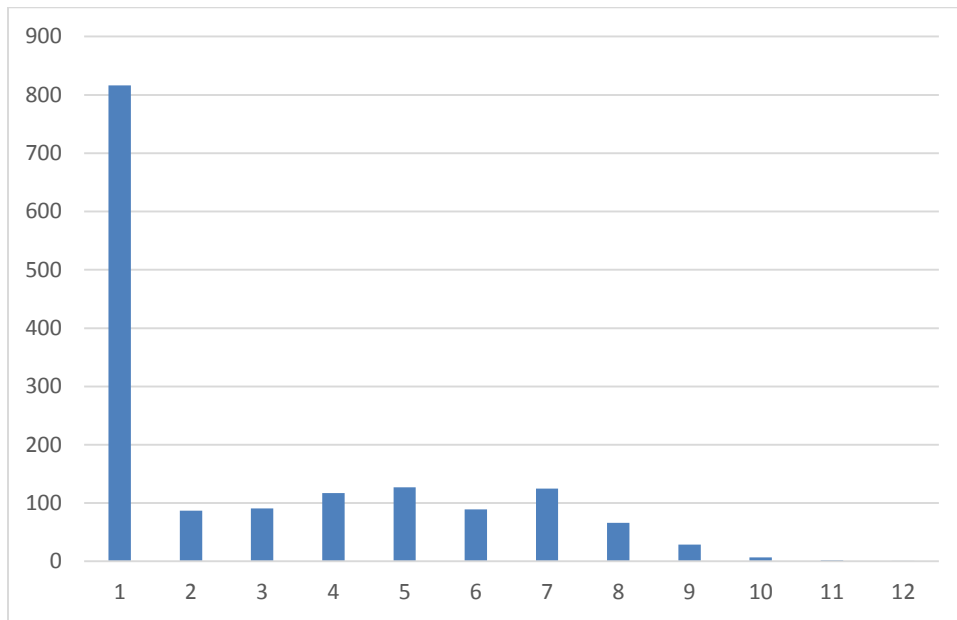
Tabla 58 Tabla de frecuencia giro a la derecha, análisis general.

Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	1,00	12,49	6,745	816	816	52,41%	52,41%
2	12,5	23,99	18,245	903	87	5,59%	58,00%
3	24	35,49	29,745	994	91	5,84%	63,84%
4	35,5	46,99	41,245	1111	117	7,51%	71,36%
5	47	58,49	52,745	1238	127	8,16%	79,51%
6	58,5	69,99	64,245	1327	89	5,72%	85,23%
7	70	81,49	75,745	1452	125	8,03%	93,26%
8	81,5	92,99	87,245	1518	66	4,24%	97,50%
9	93	104,49	98,745	1547	29	1,86%	99,36%
10	104,5	115,99	110,245	1554	7	0,45%	99,81%
11	116	127,49	121,745	1556	2	0,13%	99,94%
12	127,5	139	133,25	1557	1	0,06%	100,00%
			Total		1557	100%	

Fuente: Elaboración Propia

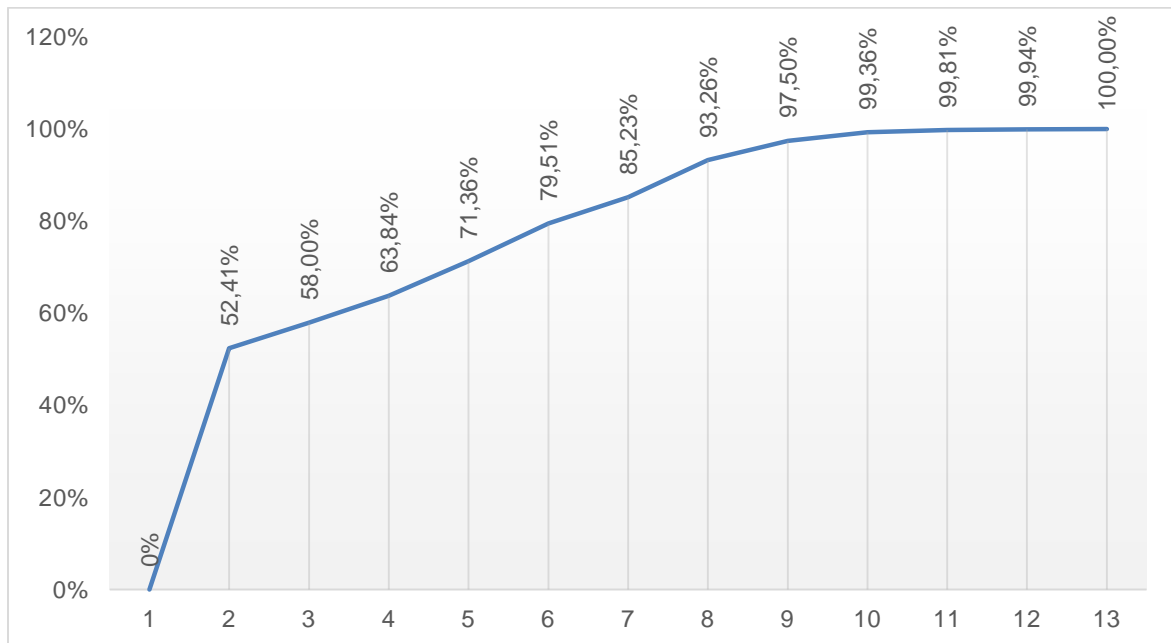
En este caso, se aprecia como 816 datos se agrupan en el primer intervalo lo que equivale a más del 50% de los datos observados, lo que nos indica que los datos una tendencia a observar datos bajitos la mayor parte del tiempo. Por otro lado, en el histograma de frecuencias absolutas, existe una distribución casi uniforme en los intervalos 2 a 8 mientras que los últimos intervalos de clase poseen pocos datos observados.

Gráfica 37 Histograma tiempos de giro a la derecha, análisis general.



Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 38 Ojiva porcentual tiempos de giro a la derecha, análisis general.



Fuente: Elaboración Propia.

Para el caso del giro a la derecha, la media aritmética alcanza un valor de 29,72 segundos lo que equivale a una diferencia de 5,22 segundos respecto al giro a la izquierda, por lo que el tiempo promedio de giro a la derecha es 14,94% menor al tiempo de giro a la

derecha. En lo que respecta a la desviación estándar, este giro alcanza 5,22 lo que nos muestra una vez más como el número de datos recolectados ayuda a describir con mayor precisión la realidad.

4.2.3 Análisis intersecciones semaforizadas, giro a la izquierda

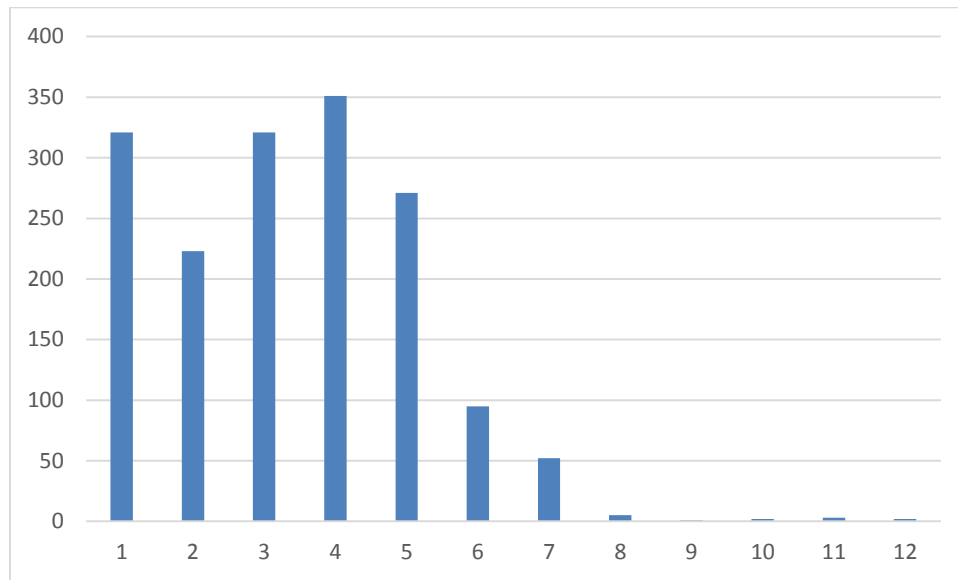
En este caso, se agruparon los tiempos de giro a la izquierda observados de las 10 intersecciones viales reguladas por semáforo (Intersección vial 1, 4, 7, 8, 9, 11, 15, 16, 17 y 18), totalizando 1647 tiempos. Estos, fueron agrupados en la [tabla de frecuencia 59](#), mediante 12 intervalos de clase, donde el menor tiempo registrado fue de 2 segundos y un máximo de 185 segundos.

Tabla 59 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersecciones semaforizadas.

Intervalo	Intervalos de Clase		Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
	Límite Inferior	Límite Superior					
1	2,00	17,24	9,62	321	321	19,49%	19,49%
2	17,25	32,49	24,87	544	223	13,54%	33,03%
3	32,5	47,74	40,12	865	321	19,49%	52,52%
4	47,75	62,99	55,37	1216	351	21,31%	73,83%
5	63	78,24	70,62	1487	271	16,45%	90,29%
6	78,25	93,49	85,87	1582	95	5,77%	96,05%
7	93,5	108,74	101,12	1634	52	3,16%	99,21%
8	108,75	123,99	116,37	1639	5	0,30%	99,51%
9	124	139,24	131,62	1640	1	0,06%	99,57%
10	139,25	154,49	146,87	1642	2	0,12%	99,70%
11	154,5	169,74	162,12	1645	3	0,18%	99,88%
12	169,75	185	177,375	1647	2	0,12%	100,00%
			Total		1647	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

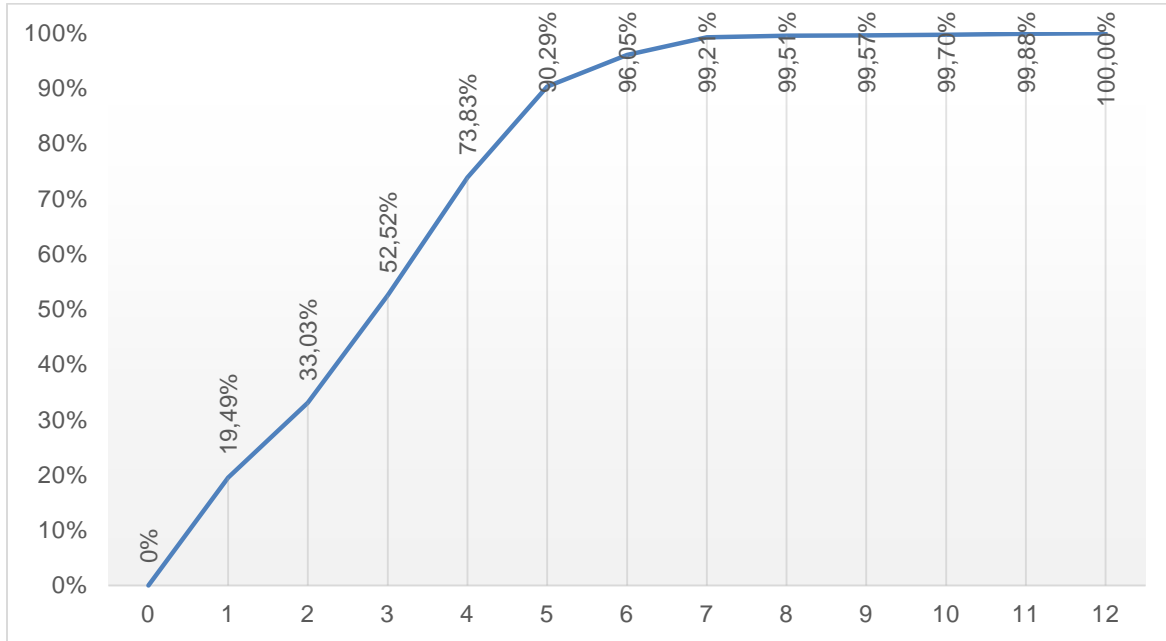
En este tipo de intersecciones existen gran cantidad de datos en los 5 primeros intervalos de clase, resultando que el intervalo 4 es el que posee el mayor número de datos, seguido muy de cerca por el intervalo 1. Por el contrario, los últimos 5 intervalos tan solo agrupan el 0.79% de los datos, lo que nos indica una fuerte tendencia hacia los primeros intervalos y que los últimos intervalos poseen datos atípicos poco observados y son dados por momentos particulares del análisis cuando las colas de espera en las intersecciones alcanzan tal magnitud que los vehículos deben esperar hasta dos ciclos en los semáforos antes de realizar el movimiento de giro. Todo esto puede observarse en la [gráfica 39](#) de histograma de frecuencias.

Gráfica 39 Histograma tiempos de giro a la izquierda, intersecciones semaforizadas.

Fuente: Elaboración Propia.

En el caso de la ojiva porcentual, observada en la [gráfica 40](#), se observa como el 90.29% de los datos se agrupan en los primeros 5 intervalos, dejando el porcentaje restante repartido en los siguientes 7 intervalos.

Por consiguiente, la media aritmética resulta en 45,75 segundos con una desviación estándar de 6,07. Mientras que realizando el promedio de tiempos con los resultados de las medias aritméticas de las intersecciones semaforizadas dicho valor resulta en 46.92 segundos, resultado un poco mayor al obtenido mediante el análisis de todos los datos en la tabla de frecuencia.

Gráfica 40 Ojiva porcentual tiempos de giro a la izquierda, intersecciones semaforizadas.

Fuente: Elaboración Propia.

4.2.4 Análisis intersecciones semaforizadas, giro a la derecha

Para el análisis de giro a la derecha, se agruparon 892 tiempos, registrados de las 7 intersecciones viales donde se pudo observar dicho movimiento (intersección vial 1, 4, 7, 11, 16, 17 y 18). Para el análisis mediante tabla de frecuencia (ver [tabla 60](#)) resultaron 11 intervalos de clase donde el valor máximo es 137 segundos y el valor mínimo 2 segundos.

Tabla 60 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersecciones semaforizadas.

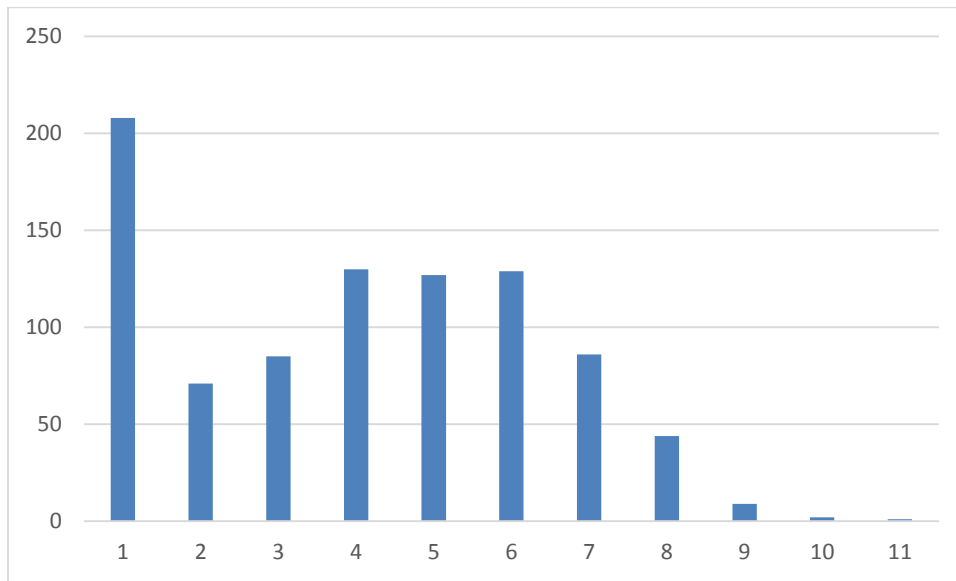
Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	2,00	14,44	8,22	208	208	23,32%	23,32%
2	14,45	26,89	20,67	279	71	7,96%	31,28%
3	26,9	39,34	33,12	364	85	9,53%	40,81%
4	39,35	51,79	45,57	494	130	14,57%	55,38%
5	51,8	64,24	58,02	621	127	14,24%	69,62%
6	64,25	76,69	70,47	750	129	14,46%	84,08%
7	76,7	89,14	82,92	836	86	9,64%	93,72%
8	89,15	101,59	95,37	880	44	4,93%	98,65%
9	101,6	114,04	107,82	889	9	1,01%	99,66%
10	114,05	126,49	120,27	891	2	0,22%	99,89%

11	126,5	139	132,75	892	1	0,11%	100,00%
			Total		892	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

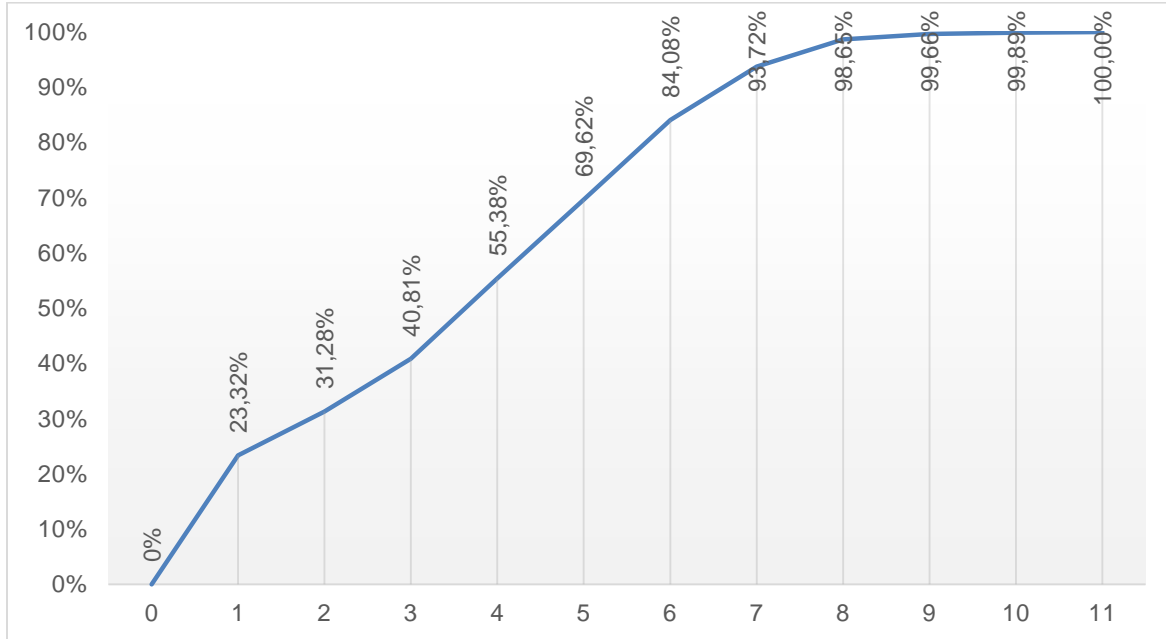
En el histograma de frecuencias se observa como el intervalo de clase 1 posee la mayor cantidad de datos. Además, cómo la distribución agrupa en cada intervalo los datos de manera considerable hasta el intervalo 8, los últimos 3 intervalos agrupan menos del 2% del total de los datos.

Gráfica 41 Histograma tiempos de giro a la derecha, intersecciones semaforizadas.



Fuente: Elaboración Propia.

En cuanto a la ojiva porcentual de estos datos se observa como el 98,65% de los datos se agrupan en los 8 intervalos, comprobando lo anteriormente descrito. En conclusión, la media aritmética alcanza 46.02 segundos con una desviación estándar de 5.15. Respecto al resultado del giro a la izquierda en intersecciones semaforizadas, este resultado es superior en 0.27 segundos lo que nos indica una alta similitud en los tiempos de ambos giros en estas clases de intersección.

Gráfica 42 Ojiva porcentual tiempos de giro a la derecha, intersecciones semaforizadas.

Fuente: Elaboración Propia.

4.2.5 Análisis intersecciones reguladas mediante PARE o Ceda el Paso, giro a la izquierda

Para el análisis del giro a la izquierda en las intersecciones viales con regulación mediante señalización de Pare o Ceda el Paso (intersecciones viales 2, 3, 5, 6, 10, 12, 13, 14, 19 y 20), se analizaron un total de 990 datos los cuales fueron agrupados en la tabla de frecuencia 62 en 11 intervalos de clase.

Tabla 61 Tabla de frecuencia giro a la izquierda, intersecciones reguladas mediante PARE o Ceda el Paso.

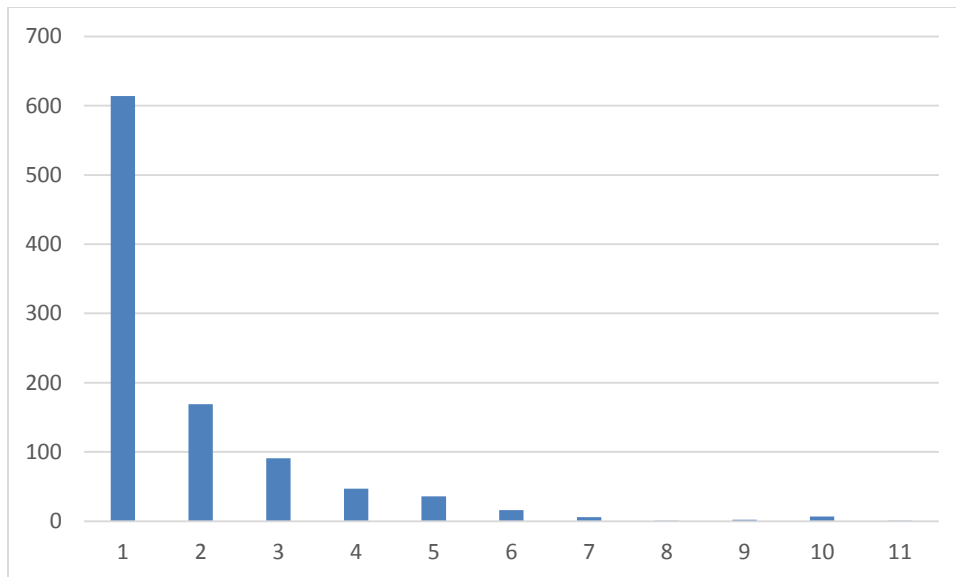
Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	1,00	12,81	6,905	614	614	62,02%	62,02%
2	12,82	24,63	18,725	783	169	17,07%	79,09%
3	24,64	36,45	30,545	874	91	9,19%	88,28%
4	36,46	48,27	42,365	921	47	4,75%	93,03%
5	48,28	60,09	54,185	957	36	3,64%	96,67%
6	60,1	71,91	66,005	973	16	1,62%	98,28%
7	71,92	83,73	77,825	979	6	0,61%	98,89%
8	83,74	95,55	89,645	980	1	0,10%	98,99%

9	95,56	107,37	101,465	982	2	0,20%	99,19%
10	107,38	119,19	113,285	989	7	0,71%	99,90%
11	119,2	131	125,1	990	1	0,10%	100,00%
			Total		990	100%	

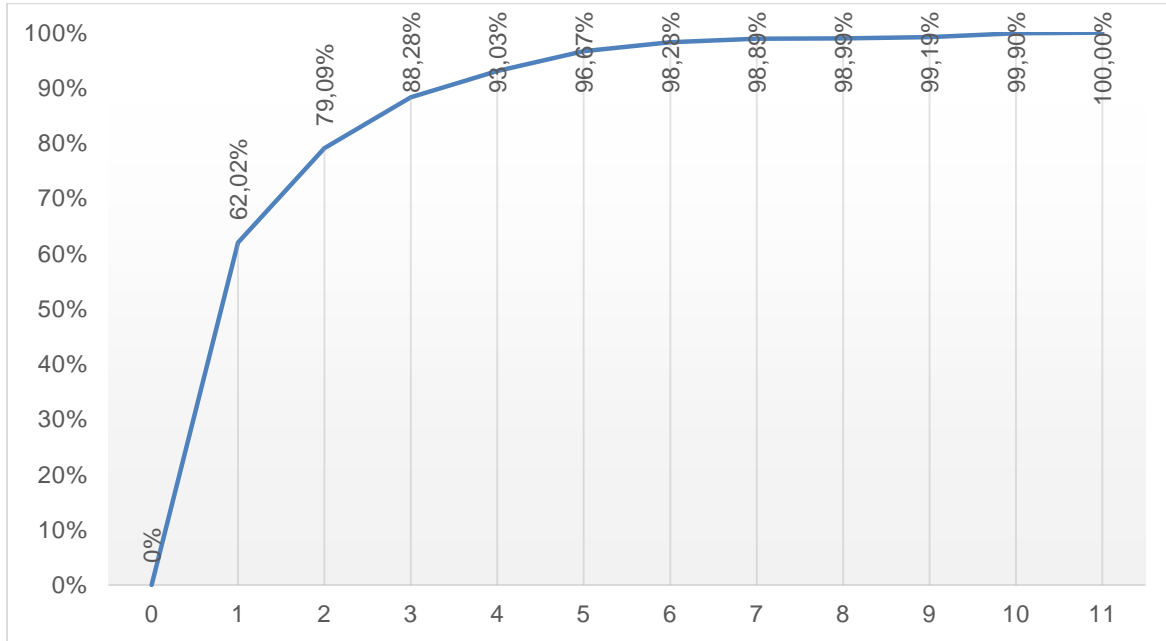
Fuente: Elaboración Propia.

En las [gráficas 43](#) y [44](#) que pertenecen a histograma y ojiva porcentual de los datos se puede ver como el 62.02% de los tiempos se agrupan en el primer intervalo de clase, el cual abarca entre 1 segundo y 12,81 segundos. Esto nos indica que las medidas de tendencia central estarán cerca a estos valores debido a que la gran cantidad de datos que se agrupan en los primeros intervalos, 93.03% en los primeros 5 intervalos de clase. Por otro lado, tan solo el 1.72% de los tiempos se agrupan en los últimos 4 intervalos, los cuales corresponden a tiempos mayores a 71,92 segundos y hasta 130 segundos. Estos datos fueron registrados, en su gran mayoría, en la intersección vial 3 la cual posee la particularidad de que el movimiento de giro a la izquierda se incorpora desde una vía de un carril a otra de dos carriles con alto flujo vehicular por lo que las colas de espera alcanzaban un tiempo de espera alto.

Gráfica 43 Histograma de frecuencia giro a la izquierda, intersecciones reguladas mediante PARE o Ceda el Paso.



Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 44 Ojiva porcentual giro a la izquierda, intersecciones reguladas mediante PARE o Ceda el Paso.

Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, la media aritmética para este caso resultó en 17.03 segundos con una desviación estándar de 6.49. Dicho resultado se diferencia en 4.17 segundos respecto al promedio de los resultados de cada intersección presente en los datos, por lo que en este caso si es relevante utilizar todos los datos recolectados y agruparlos mediante tabla de frecuencia.

4.2.6 Análisis intersecciones reguladas mediante PARE o Ceda el Paso, giro a la derecha

Para este análisis se agruparon las intersecciones viales reguladas mediante Pare o Ceda el paso donde se pudo observar el movimiento de giro a la derecha (intersección vial 2, 5, 6, 10, 12, 13, 19 y 20), totalizando 665 tiempos agrupados en 11 intervalos de clase, que se observan en la [tabla 62](#). Para este caso, el valor máximo registrado fue de 60 segundos, mientras el mínimo fue de 1 segundo.

Tabla 62 Tabla de frecuencia giro a la derecha, intersecciones reguladas mediante PARE o Ceda el Paso.

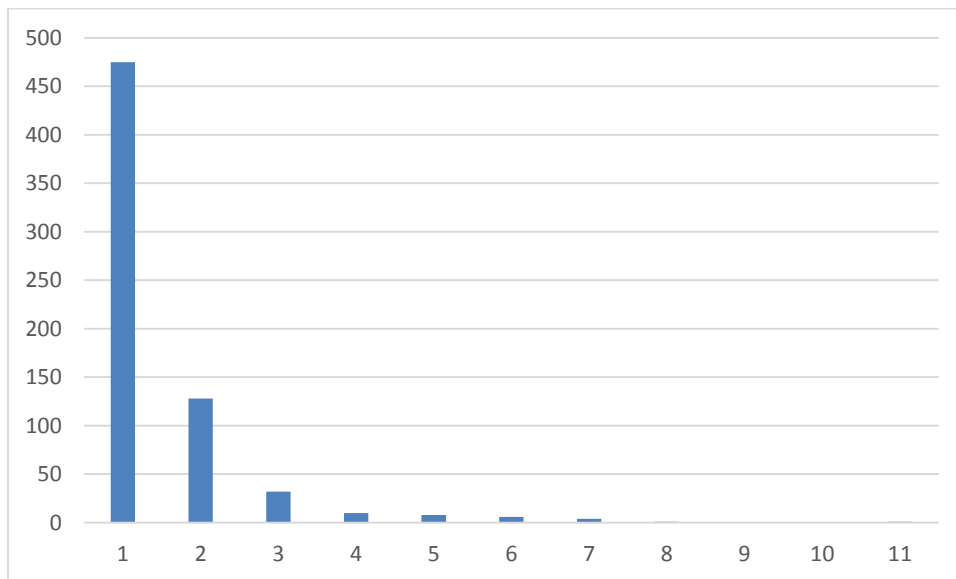
Intervalos de Clase			Marca de Clase (Ti)	FIA	FI	FR	FRA
Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior					
1	1,00	6,35	3,675	475	475	71,43%	71,43%

2	6,36	11,71	9,035	603	128	19,25%	90,68%
3	11,72	17,07	14,395	635	32	4,81%	95,49%
4	17,08	22,43	19,755	645	10	1,50%	96,99%
5	22,44	27,79	25,115	653	8	1,20%	98,20%
6	27,8	33,15	30,475	659	6	0,90%	99,10%
7	33,16	38,51	35,835	663	4	0,60%	99,70%
8	38,52	43,87	41,195	664	1	0,15%	99,85%
9	43,88	49,23	46,555	664	0	0,00%	99,85%
10	49,24	54,59	51,915	664	0	0,00%	99,85%
11	54,6	131	92,8	665	1	0,15%	100,00%
			Total		665	100%	

Fuente: Elaboración Propia.

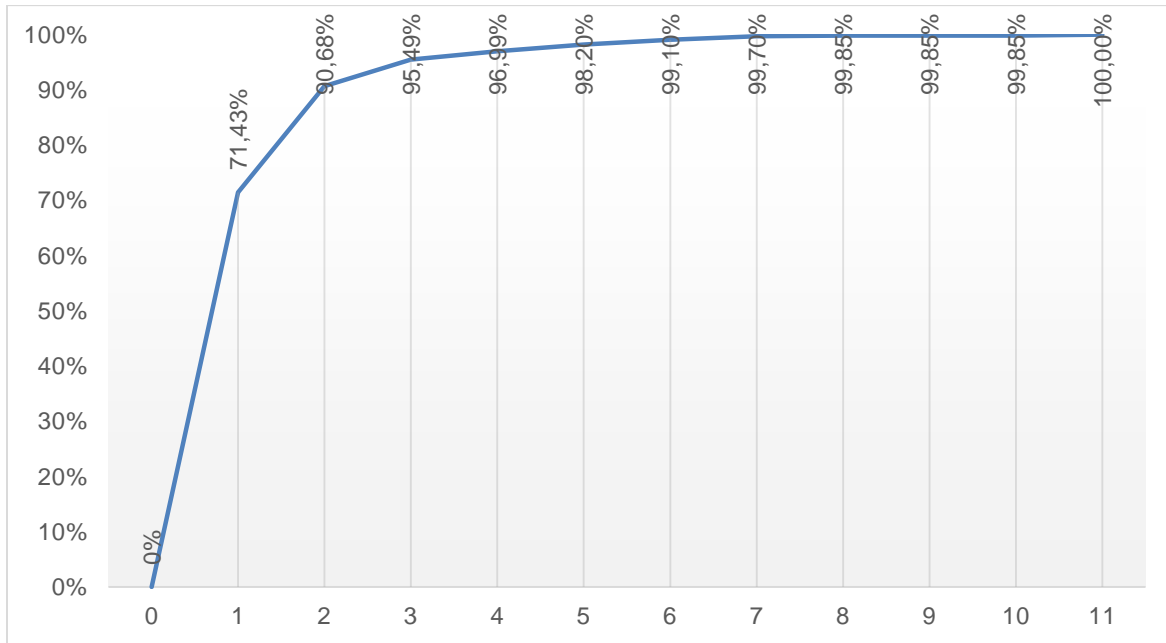
En las gráficas de histograma de frecuencias (ver [gráfica 45](#)) y ojiva porcentual (ver [gráfica 46](#)) se observa como el primer intervalo, el posee un límite inferior de 1 segundo y un límite superior de 6,23, agrupa el 71,43% de los datos, es decir, 475 tiempos de giro. Esto hace que la media aritmética de 6,35 segundos este sobre este intervalo de clase donde además la desviación estándar de 4,66, muy cerca en su valor a la media aritmética, nos muestra la alta dispersión que existe entre los datos recolectados.

Gráfica 45 Histograma de frecuencia giro a la derecha, intersecciones reguladas mediante PARE o Ceda el Paso.



Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 46 Histograma de frecuencia giro a la izquierda, intersecciones reguladas mediante PARE o Ceda el Paso.



Fuente: Elaboración Propia.

4.2.7 Resumen y resultados penalidades por giro

En la [tabla 63](#), se observa el resumen de los cálculos analizados en los apartados anteriores. En el análisis general, donde se agruparon todos los tiempos recolectados por cada giro, el resultado de las penalidades, es decir, el tiempo que les toma realizar el movimiento de giro a la izquierda fue de 34,94 segundos y 29,72 para el giro a la derecha. Por otro lado, cuando se decide realizar un análisis agrupando las intersecciones viales según el tipo de regulación de tráfico (intersecciones reguladas mediante semáforo y Pare o Ceda el Paso) ya qué es la que más afecta el tiempo de giro. En el caso de las intersecciones semaforizadas, las penalidades para el giro a la izquierda y derecha resultaron en 45,75 segundos y 46,02 segundos respectivamente, lo que nos indica que en este tipo de intersecciones los tiempos de giro son mayores, pero existe una equivalencia entre ambos. Por otro lado, en las intersecciones viales reguladas por señalización Pare o Ceda el Paso ocurre lo contrario, donde el tiempo de giro a la izquierda es de 17,03 segundos y a la derecha 6,35 segundos, evidenciándose una disminución considerable respecto a las intersecciones semaforizadas y al escenario general, sobretodo en el caso del giro a la derecha.

Tabla 63 Resumen de cálculo de penalidades por giro.

Análisis	Tiempos en segundos			
	Giro Izquierda		Giro derecha	
	Media aritmética	# Datos	Media aritmética	# Datos
General	34,94	2637,00	29,72	1557,00
Intersecciones reguladas por semáforo	45,75	1647,00	46,02	892,00
Intersecciones reguladas por Pare o Ceda el paso	17,03	990,00	6,35	665,00

Fuente: Elaboración Propia.

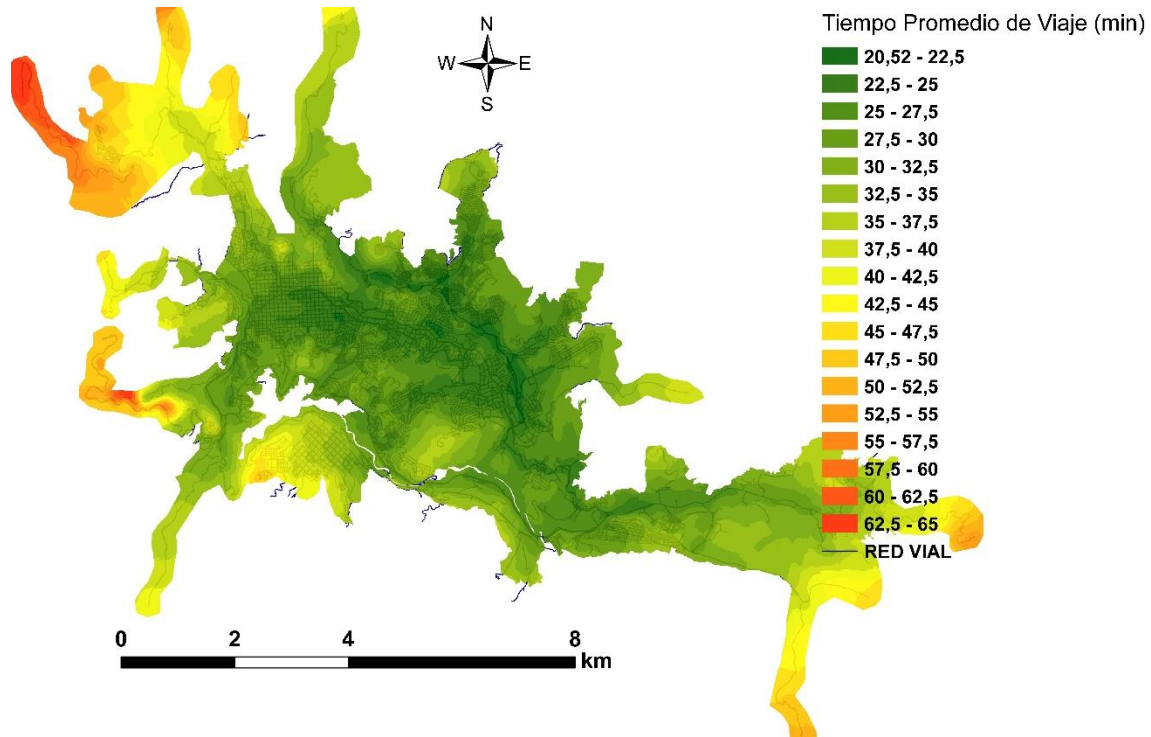
4.3 Accesibilidad Media Global y Gradiente de Ahorro

En esta fase de los resultados, se presentará la accesibilidad media global calculada con las penalidades por giro subjetivas, 69 segundos para el giro a la izquierda y 60 segundos para el giro a la derecha, usadas en investigaciones anteriores a está. Por otra parte, la accesibilidad media global calculada con las penalidades por giro medidas en esta investigación a partir de la metodología propuesta, que alcanzan 34,94 segundos para el giro a la izquierda y 29,72 segundos para el giro a la derecha. Por último, las diferencias encontradas entre ambos escenarios serán medidas mediante el gradiente de ahorro.

4.3.1 Accesibilidad Media Global para Manizales calculadas con penalidades por giro subjetivas

En la [figura 68](#) se pueden observar las curvas isócronas de accesibilidad media global para la ciudad de Manizales, calculada con las penalidades por giro subjetivas utilizadas en múltiples investigaciones previas llevadas a cabo en la ciudad en este tema. Entre los resultados más relevantes se cuenta que el tiempo promedio de viaje mínimo es de 20,52 minutos, el cual se da en lugares aledaños a la Avenida Kevin Ángel y cerca al centro de la ciudad. Está curva isócrona de accesibilidad, que se encuentra entre 20,52 minutos y 22,5 minutos, apenas cubre una parte mínima de la ciudad, 63 ha y 8681 personas, lo cual puede observarse en los histogramas de área (ver [gráfica 48](#)) y población (ver [gráfica 47](#)) para la accesibilidad media global. Por otro lado, el tiempo promedio de viaje máximo es de 65 minutos, el cual se encuentra en la curva isócrona entre 62,5 minutos y 65 minutos, que cubre 29 Ha del área de la ciudad, lugares donde no se encuentran registros de población. Las curvas isócronas de accesibilidad entre 52,5 minutos y 55 minutos representan el intervalo de tiempo promedio de viaje máximo que cubre cierta población, con 675 personas y 59 ha de área.

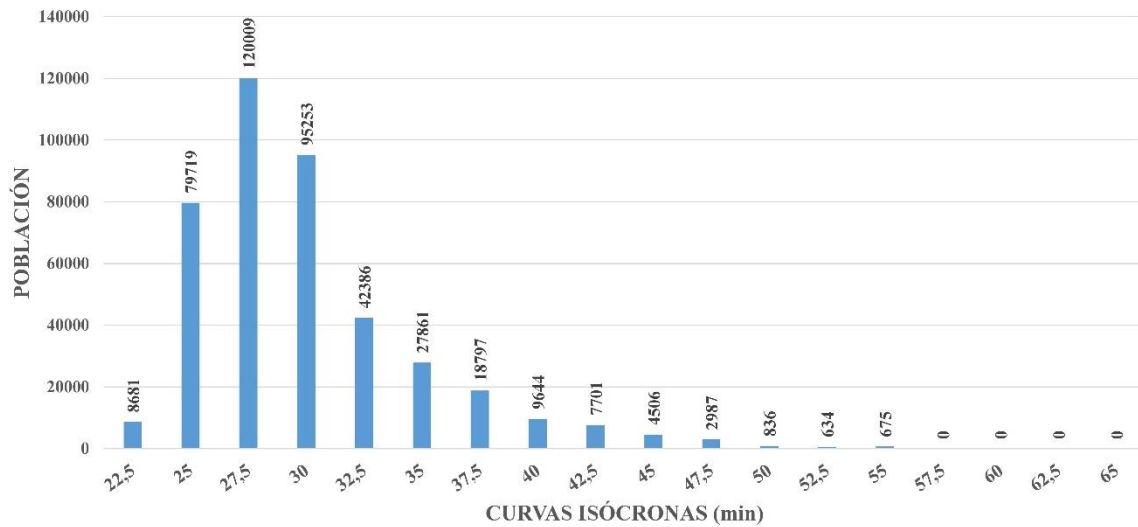
Figura 68 Curvas Isócronas de Accesibilidad Media Global para Manizales, calculadas mediante penalidades por giro subjetivas.



Fuente: Elaboración Propia.

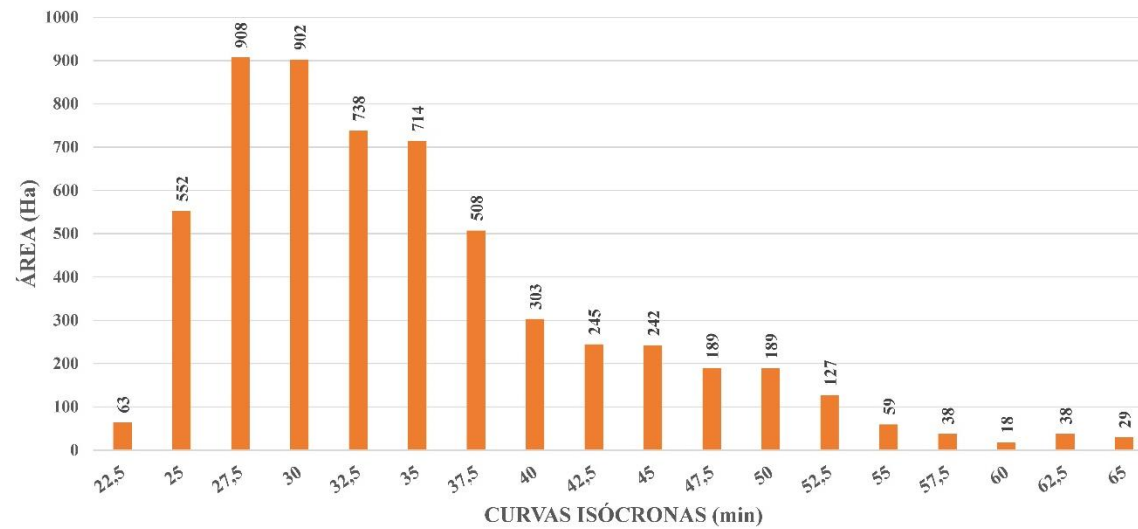
Por otra parte, las curvas isócronas de accesibilidad media global que tienen mayor envergadura, se extienden en sentido horizontal a través de las vías arteriales principales de la ciudad, las cuales poseen las velocidades promedio más altas. Entre estas, la curva isócrona entre 25 minutos y 27,5 minutos cuenta con una cobertura de 120 009 personas, cerca del 29% del total de la población y 908 ha de área cubierta, lo que equivale al 15% del total del área. En cuanto al intervalo entre 27,5 minutos y 30 minutos, el área cubierta es similar al área cubierta del intervalo anterior, con 902 ha, sin embargo, la cobertura de población disminuye hasta 95253 personas, lo que nos indica que el intervalo anterior posee una densidad poblacional más alta debido a que concentra una población mayor en un área similar de cobertura. Este comportamiento puede evidenciarse también en la [gráfica 49](#), perteneciente a la ojiva porcentual de porcentaje acumulado para la población y área donde se observa como siempre existe un porcentaje acumulado más alto de población respecto al área. Asimismo, la cobertura para tiempos promedio menores a 30 minutos alcanza el 72% de la población mientras que el área llega al 41% para el mismo tiempo.

Gráfica 47 Histograma de población, curvas isócronas de accesibilidad media global calculadas con penalidades por giro subjetivas.



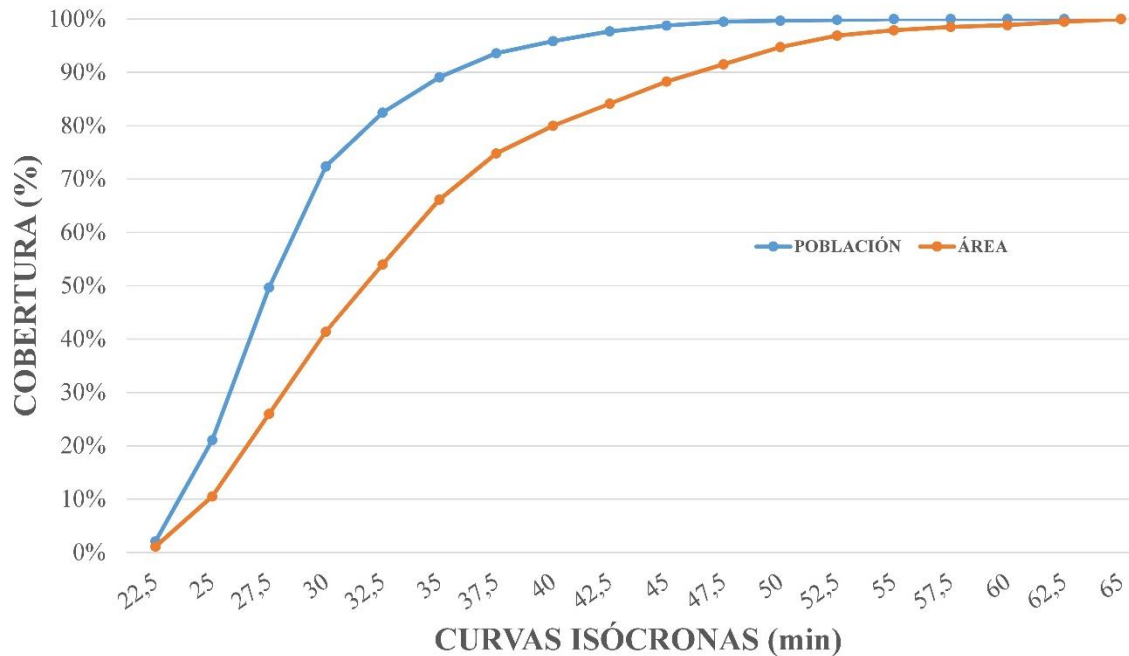
Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 48 Histograma de área, curvas isócronas de accesibilidad media global calculadas con penalidades por giro subjetivas.



Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 49 Ojiva porcentual de población y área, curvas isócronas de accesibilidad media global calculadas con penalidades por giro subjetivas.

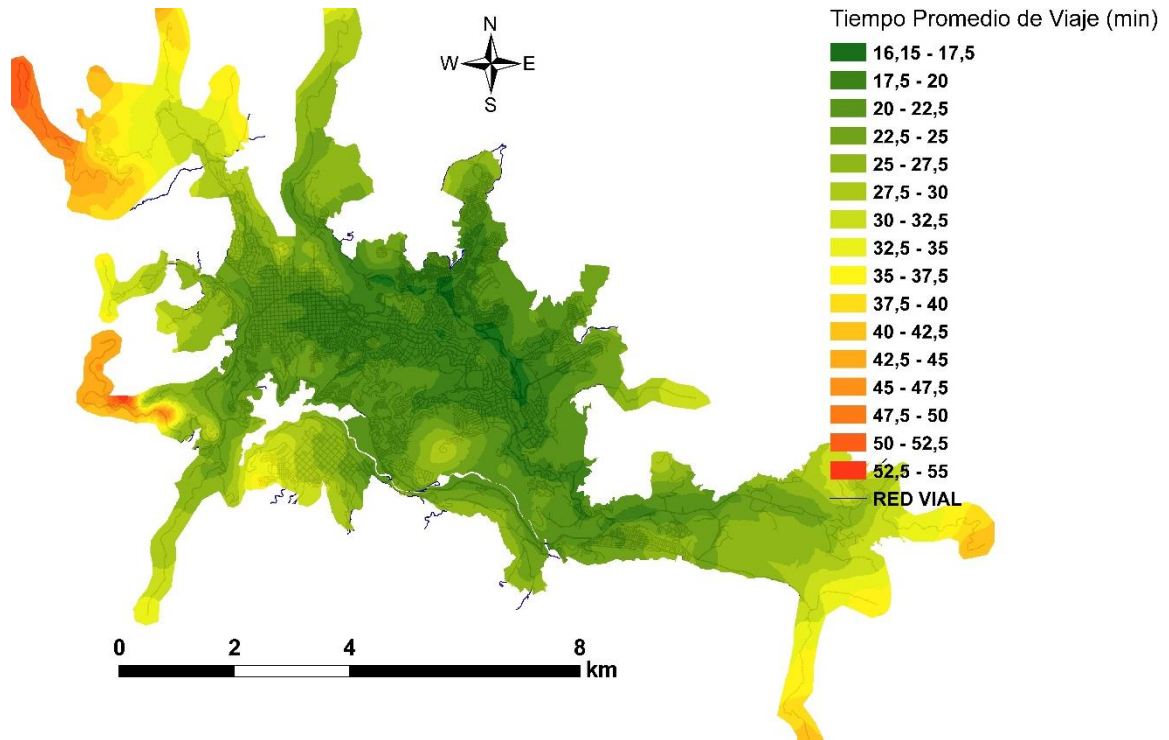


Fuente: Elaboración Propia.

4.3.2 Accesibilidad Media Global para Manizales calculadas con penalidades por giro obtenidas mediante la metodología propuesta

En la [figura 69](#) se pueden observar las curvas isócronas de accesibilidad media global para la ciudad de Manizales, calculada con las penalidades por giro obtenidas mediante la metodología propuesta, 34,94 segundos para el giro a la izquierda y 29,72 segundos para el giro a la derecha. En primer lugar, se evidencia una diferencia en el resultado del tiempo promedio de viaje mínimo, alcanzando 16,14 minutos, una diferencia de 4,36 minutos respecto al escenario calculado con penalidades por giro subjetivas. Asimismo, se dio una disminución en el tiempo promedio de viaje máximo, que en este caso alcanzó 55 minutos, una diferencia de 10 minutos respecto a al escenario anterior. Esto nos muestra como dichos valores influyen de manera directa en este modelo a través de la matriz de tiempos de viaje mínimos y el vector de tiempos promedio de viaje. Por otro lado, las principales distribuciones de las zonas de cobertura de accesibilidad poseen una congruencia en ambos escenarios, lo que nos indica que las zonas con mejor y peor accesibilidad se mantienen en ambos escenarios.

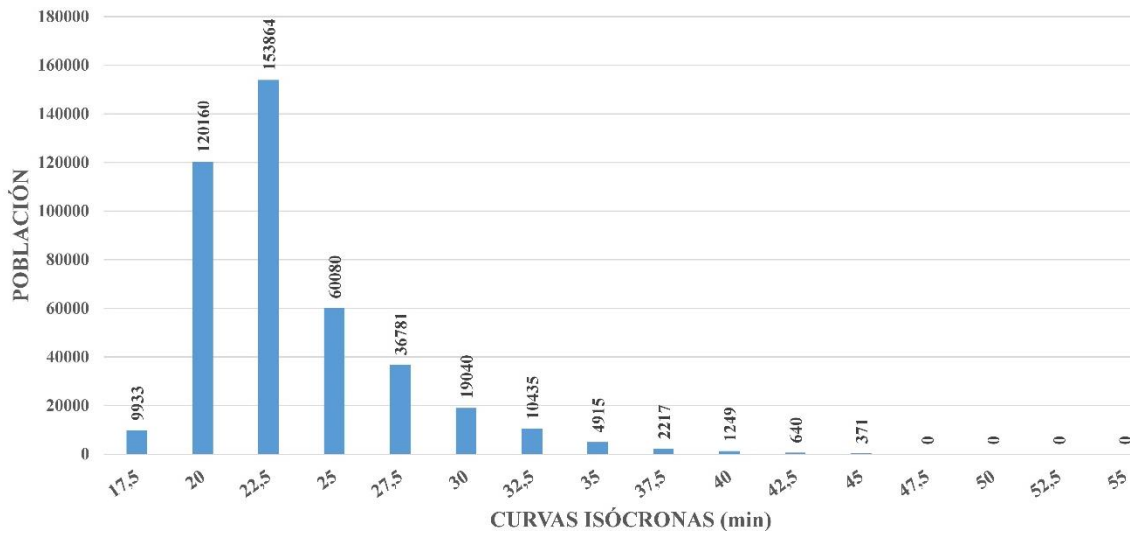
Figura 69 Curvas Isócronas de Accesibilidad Media Global para Manizales, calculadas mediante penalidades por giro obtenidas mediante la metodología propuesta.



Fuente: Elaboración Propia.

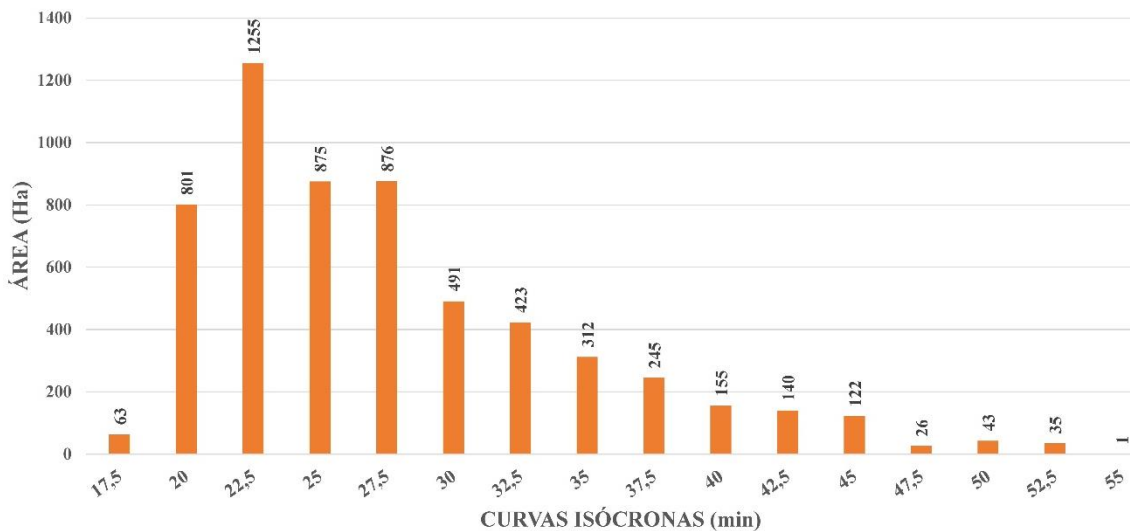
En este caso, el histograma de población y área (ver [gráfica 50](#) y [51](#) respectivamente) nos muestra como la curva isócrona con el intervalo de tiempo entre 20 minutos y 22,5 minutos es la que posee mayor número de pobladores con 153864 y un área de 1255 ha, seguida por la curva isócrona con el intervalo de tiempo entre 17,5 minutos y 20 minutos con 120160 habitantes y un área de 801 ha. Este resultado confirma la tendencia presentada en el escenario anterior donde había una gran densidad poblacional en ciertas áreas de cobertura, en este caso, dicha curva isócrona posee menos área cubierta que las curvas isócronas con intervalos de tiempo entre 22,5 minutos y 25 minutos, con 875 ha, y 25 minutos y 27,5 minutos, 876 ha, pero posee una población cubierta mayor que las anteriores que cubren respectivamente 60080 personas y 36781 personas. Por último, en la ojiva de porcentajes acumulados de población y área (ver [gráfica 52](#)), donde para tiempos promedio de viaje menor a 22,5 minutos se agrupa el 68% de la población, debido a que en estos se encuentran los dos intervalos de mayor población, mencionados anteriormente. Comparado con el escenario anterior, la cobertura para los 30 minutos de viaje o menos paso del 72% al 95% de la población, una diferencia de cobertura en la población de 92 528 personas.

Gráfica 50 Histograma de población, curvas isócronas de accesibilidad media global calculadas con penalidades por giro obtenidas mediante la metodología propuesta.



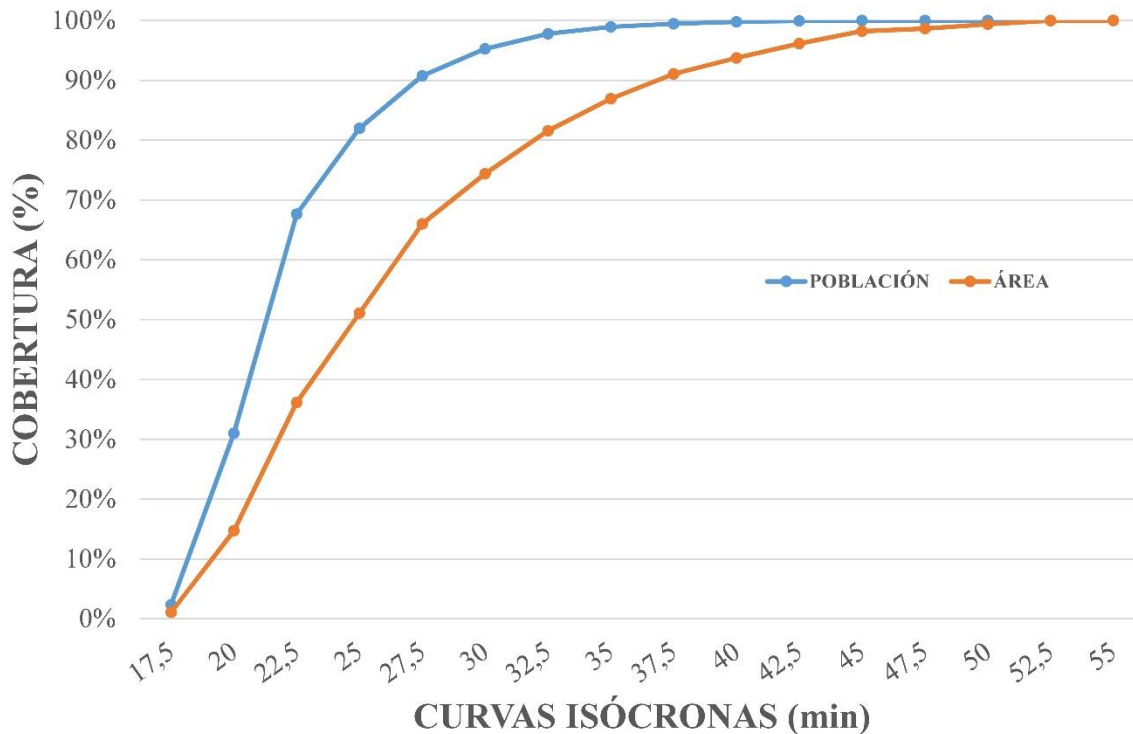
Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 51 Histograma de área, curvas isócronas de accesibilidad media global calculadas con penalidades por giro obtenidas mediante la metodología propuesta.



Fuente: Elaboración Propia.

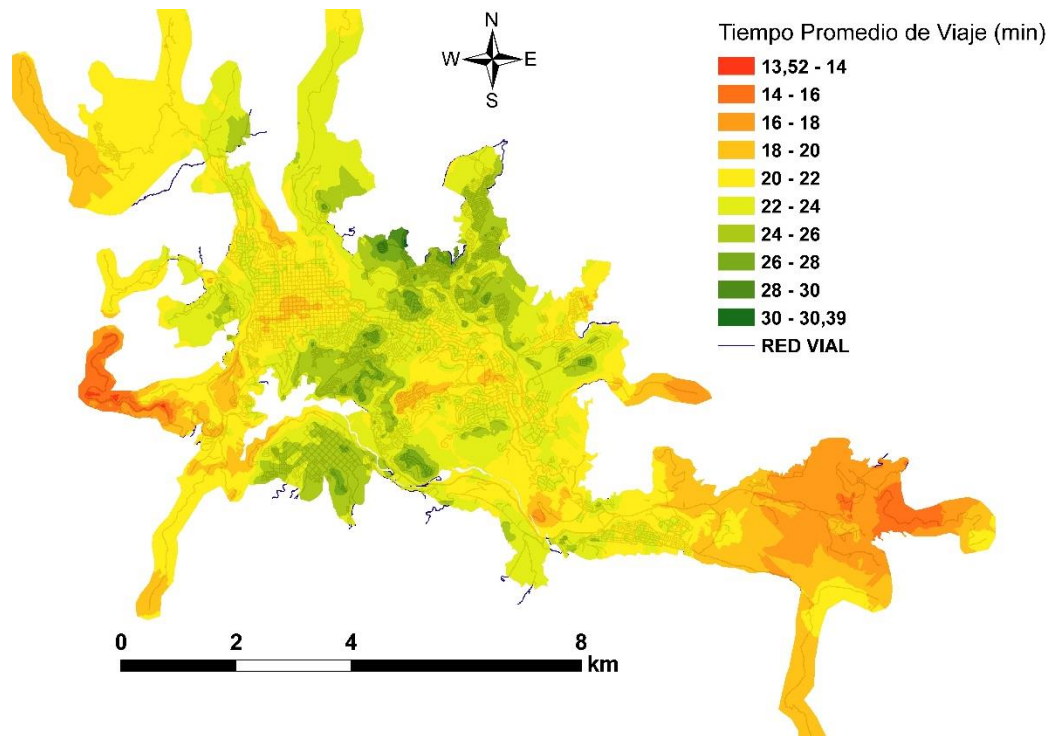
Gráfica 52 Ojiva porcentual de población y área, curvas isócronas de accesibilidad media global calculadas con penalidades por giro obtenidas mediante la metodología propuesta.



Fuente: Elaboración Propia.

4.3.3 Gradiente de Ahorro

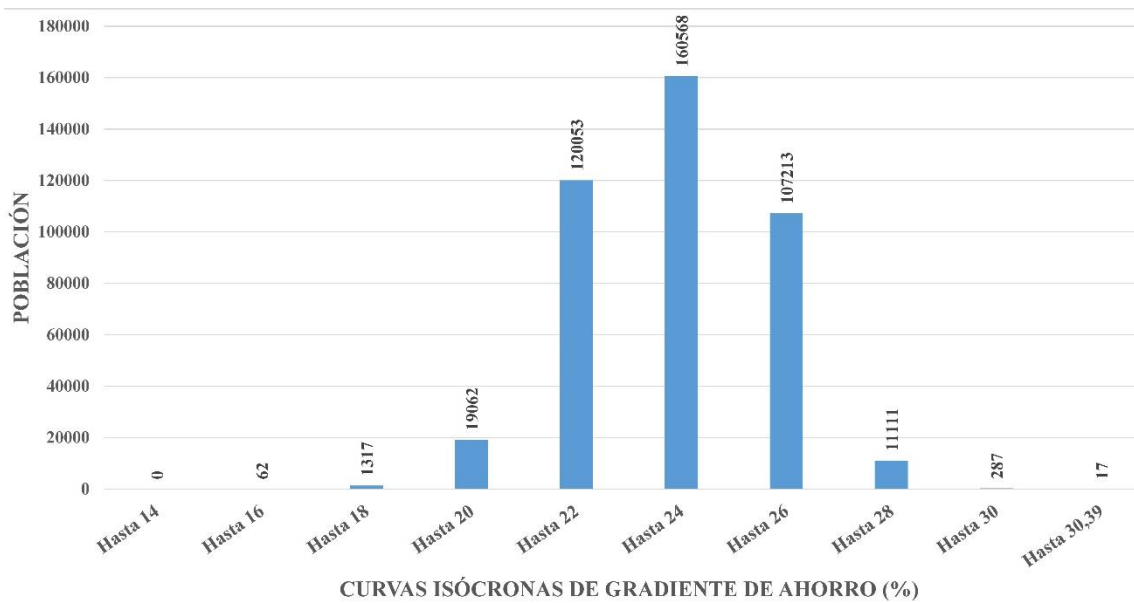
Por último, se realiza la comparación entre ambos escenarios mediante el gradiente de ahorro el cual nos permite ver la diferencia en porcentaje entre el vector de tiempos promedio de viaje de la accesibilidad media global calculada con las penalidades por giro subjetivas y el vector de tiempos promedio de viaje de la accesibilidad media global calculada con las penalidades por giro obtenidos en esta investigación a través de la metodología propuesta. En la [figura 70](#) se observan las curvas isócronas de gradiente de ahorro donde se observan porcentajes de diferencia entre 13,52% y 30,39%, evidenciándose una gran diferencia entre los vectores de tiempo promedio de viaje dadas por las penalidades por giro. En este caso, las mayores diferencias se concentraron en la parte central de la ciudad.

Figura 70 Curvas Isócronas de Gradiente de Ahorro.

Fuente: Elaboración Propia.

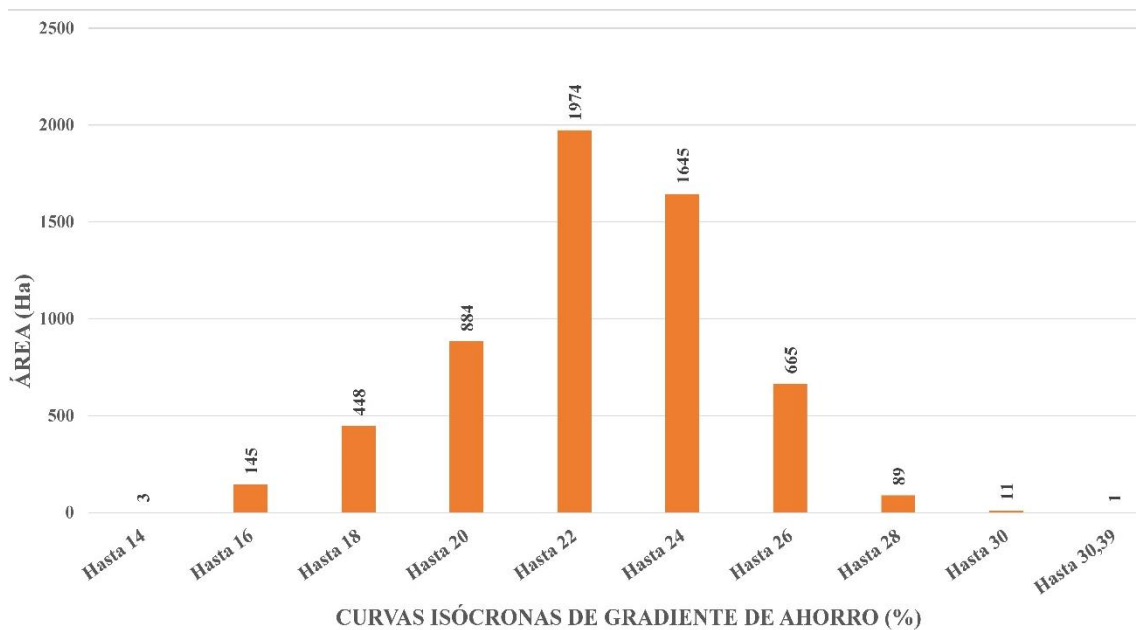
En las gráficas de histograma de población y área (ver [gráfica 53](#) y [gráfica 54](#) respectivamente) se observa como 160598 personas y 1974 ha obtienen un ahorro de entre 22% y 24%, siendo el intervalo de ahorro que posee mayor población y área. En la [gráfica 55](#), se analiza la cobertura del gradiente de ahorro, en esta se observa como gran parte de la población obtiene ahorros de hasta el 18%. En este caso también se nota como un porcentaje mayor de población respecto al área obtiene ahorros para el mismo intervalo.

Gráfica 53 Histograma de población, curvas isócronas de gradiente de ahorro.

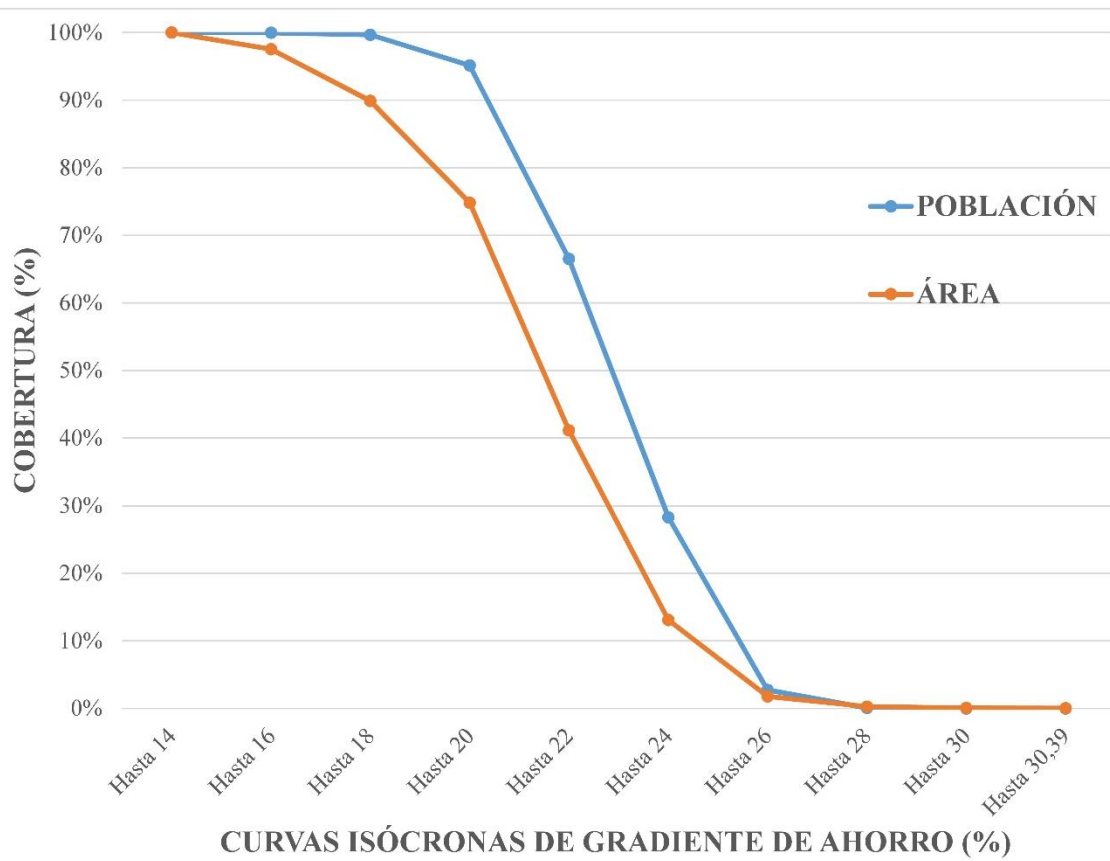


Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 54 Histograma de área, curvas isócronas de gradiente de ahorro.



Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 55 Análisis de cobertura de población y área, Gradiente de ahorro.

Fuente: Elaboración Propia.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Análisis de priorización

El análisis de priorización mediante el cual se escogieron las intersecciones viales a analizar resultó efectivo debido a que se tuvieron en cuenta variables que afectaban el tiempo de giro en las intersecciones viales. Sin embargo, estas variables pueden ser optimizadas. En primer lugar, la variable que tenía en cuenta el tipo de canalización de tráfico no resultó relevante en el análisis final debido a que esta no constituyó una variante de peso que generará beneficios o demoras al momento de realizar las maniobras de giro, por lo que esta podría ser modificada teniendo en cuenta el número de carriles por flujo, así como el número de movimientos que se pueden realizar y están presentes en cada carril. La importancia de esta variable se puede observar en la [intersección vial 3](#), en la cual se tiene un carril en el sentido sur norte con dos movimientos posibles, giro a la izquierda o continuar recto, ocasionando que ambos ocupen el mismo espacio y se generen largas colas de espera por lo que al final el promedio de tiempos de giro a la izquierda fue más elevado de lo esperado para intersecciones simples, el cual era el tipo de canalización correspondiente. Asimismo, en intersecciones simples donde se tenían dos carriles y dos movimientos o donde el número de carriles era mayor al número de movimientos, el promedio de giro fue bajo. En conclusión, la variable de canalización de tráfico puede ser sustituida por una variable que tenga en cuenta el número de carriles y movimientos simultáneos que se presenten, priorizando el análisis para aquellas intersecciones donde posea por lo menos un sentido donde la división entre el número de movimientos y el número de carriles sea mayor a uno (1), es decir, estas intersecciones tendrán un puntaje mayor.

Entre las demás variables utilizadas, las que mayor valor tienen al momento de realizar los análisis resultaron, en primera instancia, el tipo de regulación de tráfico ya que en las intersecciones semaforizadas se obtuvo un promedio de tiempo mayor en el giro a la izquierda y derecha respecto a las intersecciones reguladas por señal de PARE o Ceda el Paso. En segunda instancia, la ubicación en el sistema vial de las intersecciones resulta importante debido a que esto determina la intensidad del volumen vehicular y por lo tanto que los tiempos de espera en las intersecciones sea mayor aumentando el promedio de giro en las diferentes intersecciones. Asimismo, los análisis de auditorías en seguridad vial en las intersecciones ahorraron tiempo en el análisis posterior debido a que se conocen de antemano los posibles conflictos y el número de giros de cada una de ellas.

Finalmente, las variables utilizadas para el análisis de priorización deben ser adaptadas a cada caso particular, por lo que es indispensable tener conocimiento general de la movilidad de cada ciudad a estudiar con el fin de calibrar las variables a cada caso y escoger el número correcto de intersecciones.

5.2 Toma y Análisis de Videos

En esta investigación se utilizó una cámara de ángulo fijo para realizar la toma de videos. En algunas intersecciones, debido a las limitaciones físicas del entorno, tan solo se pudo captar un número limitado de giros en su totalidad, disminuyendo el número de datos recolectados, por lo que para próximos análisis mediante esta metodología se recomienda utilizar un mayor número de cámaras de ángulo fijo con el fin de abarcar mayor número de giros. Otra alternativa es utilizar un dron, que permita tomar una vista superior de la intersección vial analizada y así la perspectiva total de los giros de la intersección.

En cuanto al análisis de videos, al realizarlos mediante el método utilizado en esta investigación, puede tomar mucho más tiempo y se pueden presentar errores, además de que limita el análisis ya que se haría en periodos estáticos del año. Por esto, se recomienda desarrollar un software que detecte los movimientos y contabilice el tiempo de giro, mediante una adecuada toma de videos. Esto permitirá la instalación de cámaras en las intersecciones viales, con software que permitan tomar las velocidades de operación, volúmenes y el tiempo de giro de los automóviles en un tiempo menor al utilizado en esta investigación. Asimismo, una mejora sería que estas cámaras se instalen de manera fija en diversos puntos de la ciudad, lo que permitirá obtener el tiempo de giro a distintas horas del día y periodos del año, teniendo un centro de control de tráfico que permanentemente esté actualizando, analizando y manejando los datos obtenidos.

5.3 Análisis de tiempos y Cálculo de penalidades

En cuanto al análisis de tiempos por cada intersección vial es interesante destacar la gran cantidad de datos obtenidos en algunos movimientos, lo que nos indica que para intersecciones viales ubicadas donde existe un alto flujo vehicular, el tiempo utilizada para la toma de video fue suficiente. Por otro lado, en intersecciones donde se obtuvo un número de datos más bajo, la desviación estándar resulto estar muy cerca a la media aritmética, por lo que para estos casos donde el flujo vehicular es muy bajo se debería aumentar el periodo de tiempo de la toma de videos.

En cuanto al tiempo de giro según el tipo de regulación de tráfico, para las intersecciones reguladas por semáforo (giro a la izquierda con 45,75 segundos y giro a la derecha con 46,02 segundos) resulto ser más elevado que para las intersecciones reguladas por señalización de Pare o Ceda el Paso (giro a la izquierda con 17,02 segundos y giro a la derecha con 6,35 segundos), debido al tiempo de espera que se enfrentan los vehículos expuestos a los diversos ciclos del semáforo. Por otro lado, no hubo grandes diferencias entre el tiempo de giro a izquierda (45,75 segundos) y derecha (46,03 segundos) para las

intersecciones reguladas por semáforo, mientras que para las intersecciones reguladas por señalización de Pare o Ceda el paso se evidenció una clara diferencia, siendo el tiempo de giro a la izquierda (17,03 segundos) casi tres veces más que el tiempo de giro a la derecha (6,35 segundos).

En el caso general de análisis de tiempo de giro a la izquierda y derecha, que finalmente se toman como las nuevas penalidades por giro para los modelos de accesibilidad de la ciudad de Manizales, resultan en 34,94 segundos y 29,72 segundos respectivamente, se evidencia que el giro a la izquierda le toma un 15% más de tiempo en realizar la maniobra debido a que generalmente existen conflictos con tráfico directo y esto aumenta su peligrosidad, por lo que los conductores prestan más atención y tiempo a esta maniobra.

Al momento de realizar el cálculo de las penalidades por giro es importante incluir las intersecciones viales que representen lo mejor posible la movilidad de la ciudad. Teniendo en cuenta que las intersecciones viales reguladas por semáforo poseen unos tiempos de giro más altos que las intersecciones reguladas por Pare o Ceda el Paso se recomienda que sean analizadas más intersecciones de este último tipo debido a que la mayoría de intersecciones viales en las ciudades están reguladas por este método por lo que así el estudio se puede acercar más a la realidad. En nuestro caso, de las 20 intersecciones viales medidas, hubo 10 intersecciones viales semaforizadas y 10 intersecciones reguladas por Pare o Ceda el Paso, por lo que habría sido ideal que el porcentaje de intersecciones viales reguladas por Pare o Ceda el Paso fuera ligeramente superior. Por último, cada caso es particular a la ciudad de análisis por lo que determinar el porcentaje de intersecciones de cada tipo tiene que ir de la mano con el análisis de priorización y el criterio del investigador.

5.4 Accesibilidad Media Global y Gradiente de Ahorro

La inclusión de las penalidades por giro globales en los modelos de accesibilidad resultó en una gran diferencia entre los dos escenarios estudiados. El gradiente de ahorro entre el escenario calculado con las penalidades subjetivas, utilizadas en investigaciones previas y el escenario calculado con las penalidades medidas en esta investigación mediante la metodología propuesta nos indica que existe una diferencia entre 13,52% y 30,39% en los tiempos promedio de viaje, distribuidos en diferentes sectores de la ciudad. Por lo que calibrar las penalidades por giro en cada ciudad al momento de realizar el modelo de accesibilidad es fundamental para obtener resultados que se describan de manera correcta la movilidad de una ciudad.

Esta investigación actualizó el panorama de la accesibilidad media global para la ciudad de Manizales, donde se tienen tiempos promedio de viaje entre 16,15 minutos y 55 minutos, distribuyendo las curvas isócronas de accesibilidad en el sentido oriente – occidente. Asimismo, la totalidad de la población está cubierta por tiempos promedio de viaje menores a 45 minutos, sin embargo, existen áreas donde no hay registros de población que se cubren por tiempos de hasta 55 minutos, esto nos indica que en la ciudad

hay una densidad poblacional que se concentra en el área central de la ciudad donde existen unos mejores tiempos promedio de viaje.

5.5 Futuras líneas de investigación

Dadas las conclusiones resultantes en este trabajo, se pueden proponer futuras líneas de investigación.

En primer lugar, aplicar esta metodología para calcular las penalidades por giro en otra zona de estudio con el fin de realizar una comparación y calibrar mejor las variables utilizadas para el análisis de priorización.

En segundo lugar, se debe hacer una comparación entre modelos de accesibilidad para la ciudad de Manizales determinando la que describa mejor la movilidad de la ciudad. El primer modelo se calculará con las velocidades funcionales de la red vial y con las penalidades por giro actualizadas mediante esta investigación. El segundo modelo, el cual fue calculado en esta investigación, equivale a la red vial con las velocidades tomadas mediante GPS y las penalidades por giro actualizadas. El tercer modelo corresponde al cálculo utilizando las velocidades tomadas mediante GPS, sin incluir las penalidades por giro. Este último caso se mide debido a la hipótesis de que las velocidades tomadas mediante GPS traen implícitas las demoras por giro. Teniendo los tres modelos de accesibilidad, se deberá calibrar para determinar cuál de los tres modelos se adapta mejor a la ciudad de Manizales.

En tercer lugar, se puede desarrollar un software de detección de movimientos que se encargue de contabilizar el tiempo de giro para los vehículos en las intersecciones viales analizadas.

6. Referencias

- AASHTO. (2001). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. (Fourth Edition). Retrieved from https://nacto.org/docs/usdg/geometric_design_highways_and_streets_aashto.pdf
- Adams, J. (1981). *Transport Planning. Vision and Practice*. London: Routledge and Kegan Paul. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.169.4779&rep=rep1&type=pdf>
- Agrawal, A., Udmale, S. S., & Sambhe, V. K. (2018). Extended Four-Step Travel Demand Forecasting Model for Urban Planning. *Information and Communication Technology for Sustainable Development*, 10, 191–198. http://doi.org/10.1007/978-981-10-3920-1_19
- Ahuja, R. K., Mehlhorn, K., Orlin, J., & Tarjan, R. E. (1990). Faster algorithms for the shortest path problem. *Journal of the ACM*, 37(2), 213–223. <http://doi.org/10.1145/77600.77615>
- Alcaldía de Manizales. (2016). *DESARROLLO DE ACCIONES PARA LA REDUCCIÓN DE VÍCTIMAS MORTALES EN ACCIDENTES DE TRÁNSITO, EN MUNICIPIO DE MANIZALES*. Manizales.
- Alcaldía de Manizales. (2017a). *DESARROLLO DE ACCIONES PARA LA REDUCCIÓN DE VÍCTIMAS MORTALES EN ACCIDENTES DE TRÁNSITO, EN MUNICIPIO DE MANIZALES – FASE II*". Manizales.
- Alcaldía de Manizales. (2017b). *Documento tecnico de soporte. Componente general. POT 2017-2031*. Manizales.
- Alcaldía de Manizales. (2017c). *Plan Maestro de Movilidad de Manizales: Línea base y diagnóstico de la situación actual de la movilidad de Manizales*. Manizales.
- Alzate Botero, A., & Hurtado Quintero, D. E. (2007). *ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN INTELIGENTE PARA LA PLANIFICACIÓN DE*

INTERSECCIONES Y REDES COORDINADAS DE SEMÁFOROS EN LA CIUDAD DE MANIZALES. Universidad de Manizales.

- Amézquita, L. L. ., Durán Matiz, D. F. ., & Fajardo Morales, D. H. (2016). Matriz Origen-Destino Y Eficiencia En Modos De Transporte Urbano: Un Análisis De La Movilidad De Bogotá. *Semestre Económico*, 19(39), 91–111. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/1650/165046671004.pdf>
- Añez, J., De La Barra, T., & Pérez, B. (1996). Dual graph representation of transport networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 30(3 PART B), 209–216. [http://doi.org/10.1016/0191-2615\(95\)00024-0](http://doi.org/10.1016/0191-2615(95)00024-0)
- Balairón Pérez, L., López, D., Morán, R., Ramos, T., & Toledo, M. Á. (2014). Avances en investigación aplicada mediante modelación física y numérica en el diseño de la ingeniería de presas. *Ingeniería Del Agua*, 18(1), 55–69. <http://doi.org/10.4995/ia.2014.3143>
- Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 15(2), 73–80. <http://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.005>
- Batty, M. (2009). Accessibility: In search of a unified theory. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(2), 191–194. <http://doi.org/10.1068/b3602ed>
- Bauer, R., Delling, D., Sanders, P., Schieferdecker, D., Schultes, D., & Wagner, D. (2008). Combining hierarchical and goal-directed speed-up techniques for Dijkstra's algorithm. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 5038 LNCS(2), 303–318. http://doi.org/10.1007/978-3-540-68552-4_23
- Baxter, R. S., & Lenzi, G. (1975). The Measurement of Relative Accessibility. *Regional Studies*, 9(1), 15–26. <http://doi.org/10.1080/09595237500185021>
- Ben-Akiva, M., & Lerman, S. R. (1979). Disaggregate travel and mobility choice models and measures of accessibility. *Behavioural Travel Modelling*. Retrieved from <https://ci.nii.ac.jp/naid/10019232146/>
- Bocarejo, J. P., & Oviedo, D. R. (2012). Transport accessibility and social inequities: a tool for identification of mobility needs and evaluation of transport investments. *Journal of Transport Geography*, 24, 142–154. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.12.004>
- Bunge, W. (1962). Theoretical Geography. *Lund Studies in Geography, Series C*, 1. Retrieved from <https://ci.nii.ac.jp/naid/10004631608/>

- Burns, L. D. (1980). TRANSPORTATION, TEMPORAL, AND SPATIAL COMPONENTS OF ACCESSIBILITY. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/151310>
- Cal y Mayor, R., & Cárdenas, J. (2007). *Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones* (8va Edición). México D.F.: Alfaomega Grupo Editor.
- Cardona, M., Zuluaga, J. D., & Escobar, D. A. (2017). Análisis de la red de ciclo-rutas de Manizales (Colombia) a partir de criterios de accesibilidad territorial urbana y cobertura de estratos socioeconómicos. *Revista Espacios*, 38(28).
- Cardona, S., Escobar, D. A., & Moncada, C. A. (2017). Evolución del número de pasajeros movilizados en los Sistemas estratégicos de transporte público en Colombia. Análisis cuantitativo. *Espacios*, 38(53).
- Cardozo, O., Gómez, L., & Parras, M. (2009). teoría de grafos y sistemas de información geográfica aplicados al transporte público de pasajeros en Resistencia (Argentina). *Revista Transporte y Territorio*, (1), 89–111.
- Cesario, F. J. (1974). More on the Generalized Trip Distribution Model. *Journal of Regional Science*, 14(3), 389–397. <http://doi.org/10.1111/j.1467-9787.1974.tb00461.x>
- Cherkassky, B. V., Goldberg, A. V., & Radzik, T. (1996). Shortest paths algorithms: Theory and experimental evaluation. *Mathematical Programming*, 73(2), 129–174. <http://doi.org/10.1007/BF02592101>
- Chicago Area Transportation Study (1959). *Chicago Area Transportation Study: Final report in three parts*. Springfield. Chicago.
- Cirino, S., Gonçalves, L. A., Gonçalves, M. B., & Souza De Cursi, E. (2018). A nonlinear model for localization of hospital services as an indicator of accessibility. *Cadernos de Saude Pública*, 34(3), 1–12. <http://doi.org/10.1590/0102-311X00185615>
- Caldwell, T. (1961). On Finding Minimum Routes in a Network With Turn Penalties. *Communications of the ACM*, 4(2), 107–108. <http://doi.org/10.1145/366105.366184>
- Congreso de La República de Colombia. (1997). *Ley 388 de 1997- Ley del Desarrollo Teritorial*. Diario Oficial.
- Curtis, C., & Scheurer, J. (2015). Performance measures for public transport accessibility: Learning from international practice. *Journal of Transport and Land Use*, 10(1), 1–26. <http://doi.org/10.5198/jtlu.2015.683>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE (2010). Proyecciones de población total por sexo y grupos de edad de 0 hasta 80 y más años (2005 – 2020). Retrieved from

http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/7Proyecciones_poblacion.pdf

- Dalvi, M. Q., & Martin, K. M. (1976). The measurement of accessibility: Some preliminary results. *Transportation*, 5(1), 17–42. <http://doi.org/10.1007/BF00165245>
- Davidson, K. B. (1977). Accessibility in transport/land-use modelling and assessment. *Environment and Planning A*, 9(12), 1401–1416. <http://doi.org/10.1068/a091401>
- Delling, D., Sanders, P., Schultes, D., & Wagner, D. (2009). *Engineering route planning algorithms. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 5515 LNCS). http://doi.org/10.1007/978-3-642-02094-0_7
- Díaz Viera, M. A. (2002). *Geoestadística Aplicada*. Universidad Autónoma de México.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerical Mathematics*, 1(1), 269–271. <http://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF01386390>
- Duarte, A. T., Mendoza, Y. C., Arévalo, A. S., & Guerrero, T. E. (2015). Modelation of Modal Election for urban Public Transport. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1(25), 83–91. <http://doi.org/https://doi.org/10.24054/16927257.v25.n25.2015.2369>
- Duque, O. A. M. (2017). *Estudio teórico del mecanismo tridimensional de falla del frente en túneles poco profundos en suelo*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from http://www.bdigital.unal.edu.co/59495/1/TesisMaestria_OAMD2017.pdf
- Escobar, D. A., & García, F. J. (2012). *ANÁLISIS DE PRIORIZACIÓN DE PROYECTOS VIALES Caso Manizales (Colombia)* (First Edition). Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.
- Escobar, D. A., Martínez, S., & Moncada, C. A. (2016). Relación entre PM10 y condiciones de accesibilidad territorial urbana en manizales (Colombia). *Informacion Tecnologica*, 27(6), 273–284. <http://doi.org/10.4067/S0718-07642016000600027>
- Escobar, D.A., Cardona, S., & Moncada, C. A. (2018a). Global Mean Accessibility in Metropolitan Areas . Case Study : Chinchiná , Colombia. *Indian Journal of Science and Technology*, 11(21). <http://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i21/123113>
- Escobar, D.A., Cardona, S., & Moncada, C. A. (2018b). Urban Territorial Accessibility Through Road Infrastructure Works and Betterment Levy Area. *Research Journal of Applied Sciences*, 13(7), 431–438. <http://doi.org/10.3923/rjasci.2018.431.438>

- Escobar, D.A., & Garcia, F. (2011). Impacto de un sistema de transporte tipo Cable sobre la movilidad urbana . Caso Manizales (Colombia). *Avances Investigación En Ingeniería*, 8(1), 92–98. Retrieved from http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/avances-8-1/r8-1_art11.pdf
- Escobar, D.A., & Garcia, F J. (2012). *Diagnostico de la Movilidad Urbana de Manizales* (Primera ed). Manizales.
- Escobar, D.A., García, F.J, & Tolosa, R. (2013). Análisis de accesibilidad territorial a nivel regional. *Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Manizales.*
- Escobar, D.A., Holguín, J. M., & Zuluaga, J. D. (2016). Accesibilidad de los centros de ambulancias y hospitales prestadores del servicio de urgencias y su relación con la inequidad espacial. Caso de estudio Manizales – Colombia. *Revista Espacios*, 37(20).
- Escobar, D.A., Tapasco, O., & Giraldo, J. (2015). Medición de Desempeño del Sistema de Transporte Cable Aéreo de la Ciudad de Manizales en Colombia, usando Tres Enfoques: Analítico, Simulado y de Accesibilidad Urbana. *Informacion Tecnologica*, 26(6), 199–210. <http://doi.org/10.4067/S0718-07642015000600020>
- Fleet, C. R., & Robertson, S. R. (1968). Trip Generation in the Transportation Planning Process. *Highway Research Record*, (240), 11–31. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/120743>
- Fraser, A. M., Chester, M. V., Eisenman, D., Hondula, D. M., Pincetl, S. S., English, P., & Bondank, E. (2017). Household accessibility to heat refuges: Residential air conditioning, public cooled space, and walkability. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 44(6), 1036–1055. <http://doi.org/10.1177/0265813516657342>
- Fredman, M. L., & Tarjan, R. E. (1987). Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms. *Journal of the ACM*, 34(3), 596–615. <http://doi.org/10.1145/28869.28874>
- Garzón Barahona, A. A., & Garzón Barahona, J. L. (2014). *METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS PLANES DE MANEJO DEL TRÁNSITO PARA OBRAS CIVILES EN LA CIUDAD DE PASTO*. Universidad de Nariño.
- Geisberger, R., & Vetter, C. (2011). Efficient routing in road networks with turn costs. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 6630 LNCS, 100–111.

- http://doi.org/10.1007/978-3-642-20662-7_9
- Geurs, K. T., & Ritseman Van Eck, J. (2001). Accessibility measures: review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transportation scenarios, and related social and economic impact.
- Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005>
- Giraldo, R. (2002). *Introducción a la geoestadística. Teoría y aplicación*. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.
- Gohari, A., Nasir Matori, A., Yusof, K. W., Toloue, I., Myint, K. C., & Sholagberu, A. T. (2018). Route/Modal choice analysis and tradeoffs evaluation of the intermodal transport network of Peninsular Malaysia. *Cogent Engineering*, 5(1), 1–19. <http://doi.org/10.1080/23311916.2018.1436948>
- Guzman, L. A., & Oviedo, D. (2018). Accessibility, affordability and equity: Assessing 'pro-poor' public transport subsidies in Bogotá. *Transport Policy*, 68(April), 37–51. <http://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.04.012>
- Guzman, L. A., Oviedo, D., & Rivera, C. (2017). Assessing equity in transport accessibility to work and study: The Bogotá region. *Journal of Transport Geography*, 58, 236–246. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.12.016>
- Hansen, W. G. (1959). How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25(2), 73–76. <http://doi.org/10.1080/01944365908978307>
- Herce Vallejo, M. (2009). *Sobre la movilidad en la ciudad : propuestas para recuperar un derecho ciudadano*. Reverté. Retrieved from https://books.google.com.co/books/about/Sobre_la_movilidad_en_la_ciudad_propuestas.html?id=iEuO6jfdR_gC&redir_esc=y
- Hyndman, R. J. (1995). The problem with Sturges' rule for constructing histograms. *Monash University*, (July), 1–2. <http://doi.org/10.1111/j.2041-6962.1995.tb00733.x>
- Ingram, D. R. (1971). The Concept of Accessibility: A search for an operational form. *Regional Studies*, 5(2), 101–107. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/09595237100185131>
- Kwok, R. C. W., & Yeh, A. G. O. (2004). The use of modal accessibility gap as an indicator for sustainable transport development. *Environment and Planning A*, 36(5), 921–936.

- <http://doi.org/10.1068/a3673>
- Li, Y., Zhao, L., & Dong, H. (2014). Design and Simulation Analysis of At-Grade Intersection Channelization of City Roads. *Tehnički Vjesnik*, 21(5), 995–999.
- Ling, H. I., Mohri, Y., Kawabata, T., Liu, H., Burke, C., & Sun, L. (2003). Centrifugal Modeling of Seismic Behavior of Large-Diameter Pipe in Liquefiable Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(12), 1092–1101. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:12\(1092\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:12(1092))
- Loaiza, C., Holguín, J., & Escobar, D.A. (2016). Análisis comparativo de alternativas viales entre Manizales y Mariquita (Colombia) a través de un estudio de accesibilidad territorial. *Informacion Tecnologica*, 27(5), 231–242. <http://doi.org/10.4067/S0718-07642016000500024>
- Lucas, K., van Wee, B., & Maat, K. (2016). A method to evaluate equitable accessibility: combining ethical theories and accessibility-based approaches. *Transportation*, 43(3). <http://doi.org/10.1007/s11116-015-9585-2>
- Mamun, S. A., Lownes, N. E., Osleeb, J. P., & Bertolaccini, K. (2013). A method to define public transit opportunity space. *Journal of Transport Geography*, 28. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.12.007>
- Marvin, S., & Guy, S. (1999). POLICY FORUM: Towards a new logic of transport planning? *Town Planning Review*, 70(2), 139–158. <http://doi.org/10.3828/tpr.70.2.e7856q7l68802614>
- Matheron, G. (1963). Principles of Geostatistics. *Economic Geology*, 58, 1246–1266.
- Mavoa, S., Witten, K., McCreanor, T., & O'Sullivan, D. (2012). GIS based destination accessibility via public transit and walking in Auckland, New Zealand. *Journal of Transport Geography*, 20(1), 15–22. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.10.001>
- Micó, J. C., & Soler, D. (2011). The capacitated general windy routing problem with turn penalties. *Operations Research Letters*, 39(4), 265–271. <http://doi.org/10.1016/j.orl.2011.04.007>
- Ministerio de Transporte. (2015). Manual De Señalización Vial: Dispositivos Uniformes Para La Regulación De Tránsito En Calles, Carretras Y Ciclorrutas De Colombia.
- Miramontes, E., Vidaña, J., & Rodríguez, A. (2010). Análisis y Evaluación de Intersecciones Urbanas. *CULCyT*, (56), 51–60.
- Mitullah, W. V., Vanderschuren, M. J. W. A., & Khayesi, M. (2017). *Non-motorized transport integration into urban transport planning in Africa*. Ciudad del Cabo: Routledge.

- Moncada, C. A., Cardona, S., & Escobar, D. A. (2018). Saving Travel Time as an Urban Planning Instrument . Case Study : Manizales, Colombia. *Modern Applied Science*, 12(6), 44–57. <http://doi.org/10.5539/mas.v12n6p44>
- Mozes, S., Nussbaum, Y., & Weimann, O. (2017). Faster shortest paths in dense distance graphs, with applications. *Theoretical Computer Science*, 1, 1–25. <http://doi.org/10.1016/j.tcs.2017.10.034>
- Muraco, W. A. (1972). Intraurban Accessibility. *Economic Geography*, 48(4), 388–405. <http://doi.org/10.2307/142890>
- Natalini, B., Marighetti, J. O., & Natalini, M. B. (1999). Modelado en Túnel de Viento de Presiones Medias en Estructuras Planas Aisladas.
- Olarte, A. J. P., & Aldana, D. C. A. (2010). *Estudio de las teorías de arrastre de fondo sobre el río Negro, en un tramo de 100 m aguas arriba del puente Tobia - La Montaña, mediante un modelo físico*. Universidad de la Salle. Retrieved from <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/15450/T40.10P371e.pdf?sequence=1>
- Olsson, M. (2016). Functional regions in gravity models and accessibility measures. *Moravian Geographical Reports*, 24(2), 60–70. <http://doi.org/10.1515/mgr-2016-0011>
- Ortúzar, J. de D. (2000). *Modelos de Demanda de Transporte*. (Alfaomega Editorial.) (Second Edition).
- Ortúzar, J. de D., & Willumsen, L. G. (1994). *Modelling Transport. Modelling Transport* (Fourth Edition). John Wiley & Sons, Ltd. <http://doi.org/10.1002/9781119993308>
- Owens, S. (1995). From “predict and provide” to “predict and prevent”?: Pricing and planning in transport policy. *Transport Policy*, 2(1), 43–49. [http://doi.org/10.1016/0967-070X\(95\)93245-T](http://doi.org/10.1016/0967-070X(95)93245-T)
- Padeiro, M. (2018). Comparing alternative methods to measuring pedestrian access to community pharmacies. *Health Services and Outcomes Research Methodology*, 18(1), 1–16. <http://doi.org/10.1007/s10742-017-0173-0>
- Patriksson, M. (1994). *The traffic assignment problem : models and methods*. New York: Dover Publications.
- Pérez, J. M. (2013). *Estado del arte de la modelación física en ingeniería civil*. Universidad de la Salle. Retrieved from <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/22227/T40.13>

- P415e.pdf?sequence=2
- Perilla, D. J., Escobar, D. A., & Cardona, S. (2018). New Transportation Infrastructure Impact in Terms of Global Average Access - Intersection " La Carola " Manizales (Colombia) Case Study. *Contemporary Engineering Sciences*, 11(5), 215–227. <http://doi.org/https://doi.org/10.12988/ces.2018.812>
- Pirie, G. H. (1979). Measuring Accessibility: A Review and Proposal. *Environment and Planning A*, 11(3), 299–312. <http://doi.org/10.1068/a110299>
- Prasetyowati, S. suryani, Imrona, M., Ummah, I., & Sibaroni, Y. (2016). Prediction of Public Transportation Occupation Based on Several Crowd Spots Using Ordinary Kriging Method. *Journal of Innovative Technology and Education*, 3(1), 93–104. <http://dx.doi.org/10.12988/jite.2016.6723>
- Rietveld, P. (1994). Spatial economic impacts of transport infrastructure supply. *Transportation Research Part A*, 28(4), 329–341. [http://doi.org/10.1016/0965-8564\(94\)90007-8](http://doi.org/10.1016/0965-8564(94)90007-8)
- Richtlinien Für Lichtsignalanlagen (1992). *Norma Alemana Rilsa para la semaforización en Bogotá*.
- Robledo, J. E. (1996). *La Ciudad de la Colonización Antioqueña*. (Primera Edición). Universidad Nacional de Colombia. Manizales.
- Robles, D., Ñañez, P., & Quijano, N. (2009). Control y simulación de tráfico urbano en Colombia: Estado del arte. *Revista de Ingeniería*, 29, 59–69. <http://doi.org/10.16924/riua.v0i29.245>
- Rodrigue, J. P., Comtois, C., & Slack, B. (2016). *The geography of transport systems. The Geography of Transport Systems*. <http://doi.org/10.4324/9781315618159>
- Samper, F. J., & Carrera, J. (1990). *Geoestadística: aplicaciones a la hidrología subterránea*. (CIMNE, Ed.). Spain.
- Sanders, P., & Schultes, D. (2007). Engineering fast route planning algorithms. *Proceedings of the 6th International Conference on Experimental Algorithms*, 23–36. <http://doi.org/10.1007/978-3-540-72845-0>
- Schultes, D. (2008). Route Planning in Road Networks. *Ausgezeichnete Informatikdissertationen*, 1–235. <http://doi.org/10.1145/367766.368168>
- Schwar, J. F., & Huarte, J. P. (1975). *Métodos estadísticos en ingeniería de tránsito*. México: Representaciones y servicios de ingeniería S.A.
- Seguí, J. M., & Petrus, J. M. (1991). *Geografía de Redes y Sistemas de Transporte*. Madrid:

Síntesis.

- Șerbu, C., Opruța, D., & Socaciu, L. (2014). Ranking the types of intersections for assessing the safety of pedestrians using TOPSIS method. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 13(25), 242–253.
- Spiess, H., & Florian, M. (1989). Optimal strategies: A new assignment model for transit networks. *Transportation Research Part B*, 23(2), 83–102. [http://doi.org/10.1016/0191-2615\(89\)90034-9](http://doi.org/10.1016/0191-2615(89)90034-9)
- Sturges, H. A. (1926). The Choice of a Class Interval. *Journal of the American Statistical Association*, 21(153), 65–66. <http://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>
- Talen, E., & Anselin, L. (1998). Assessing spatial equity: An evaluation of measures of accessibility to public playgrounds. *Environment and Planning A*, 30(4), 595–613. <http://doi.org/10.1068/a300595>
- Te Brömmelstroet, M., & Bertolini, L. (2011). The role of transport-related models in urban planning practice. *Transport Reviews*, 31(2), 139–143. <http://doi.org/10.1080/01441647.2010.541295>
- Thériault, M., Vandersmissen, M-H., Lee-Gosselin, M., & Leroux, D. (1999). Modelling Commuter Trip Length and Duration Within GIS: Application to an O-D Survey. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 3(1), 40–56.
- Thorel, L., Ferber, V., Caicedo, B., & Khokhar, I. M. (2011). Physical modelling of wetting-induced collapse in embankment base. *Géotechnique*, 61(5), 409–420. <http://doi.org/10.1680/geot.10.P.029>
- Tolley, R. S. (2003). *Sustainable transport: planning for walking and cycling in urban environments*. Published in North America by CRC Press.
- Transportation Research Board. (2000). *Highway capacity manual. Environmental Protection*. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000746](http://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000746).
- Tyme, J. (1978). *Motorways versus Democracy*. London: Macmillan Education UK. <http://doi.org/10.1007/978-1-349-15920-8>
- van Wee, B. (2016). Accessible accessibility research challenges. *Journal of Transport Geography*, 51, 9–16. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.10.018>
- Volker, L. (2008). Route Planning in Road Networks with Turn Costs, 1–30.
- Wachs, M., & Kumagai, T. G. (1973). Physical accessibility as a social indicator. *Socio-Economic Planning Sciences*, 7(5), 437–456. <http://doi.org/10.1016/0038->

- 0121(73)90041-4
- Wang, D., Brown, G., & Mateo-Babiano, I. (2013). Beyond Proximity: an Integrated Model of Accessibility for Public Parks. *Asian Journal of Social Sciences & Humanities*, 2(3), 486–498.
- Weber, J. (2016). The properties of topological network connectivity measures and their application to U.S. urban freeway networks. *Professional Geographer*, 68(3), 485–495. <http://doi.org/10.1080/00330124.2015.1106324>
- Willson, R. (2001). Assessing communicative rationality as a transportation planning paradigm. *Transportation*, 28(1), 1–31. <http://doi.org/10.1023/A:1005247430522>
- Winter, S. (2002). Modeling costs of turns in route planning. *Geoinformatica*, 6(4), 345–361. <http://doi.org/10.1023/A:1020853410145>
- Woldeamanuel, M. G. (1975). *Concepts in urban transportation planning: the quest for mobility, sustainability and quality of life*.
- Wright, P. H., & Ashford, N. J. (1989). *Transportation Engineering: Planning and Design* (Fourth Edition). New York: Jhon Wiley & Sons, Ltd.
- Wu, Q., Qin, G., & Li, H. (2015). An Improved Dijkstra's algorithm application to multi-core processors. *Metallurgical & Mining Industry*, (9), 76–81.
- Yiannakoulis, N., Bland, W., & Svenson, L. W. (2013). Estimating the effect of turn penalties and traffic congestion on measuring spatial accessibility to primary health care. *Applied Geography*, 39, 172–182. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.12.003>
- Younes, C., Escobar, D. A., & Holguín, J. M. (2016). Equidad, accesibilidad y transporte. Aplicación explicativa mediante un análisis de accesibilidad al sector universitario de manizales (Colombia). *Informacion Tecnologica*, 27(3), 107–118. <http://doi.org/10.4067/S0718-07642016000300010>
- Yu, J., Wang, L., & Gong, X. (2013). Study on the Status Evaluation of Urban Road Intersections Traffic Congestion Base on AHP-TOPSIS Modal. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96(Cictp), 609–616. <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.071>
- Zuluaga, J. D., & Escobar, D. A.(2017a). Análisis de accesibilidad territorial de la región noroccidente de Colombia. *Revista Espacios*, 38(6), 30–45.
- Zuluaga, J. D., & Escobar, D. A.(2017b). Geomarketing Analysis for Shopping Malls in Manizales (Colombia). Accessibility approach methodology. *Revista Espacios*, 38(21), 20.
- Zuluaga, J. D., Escobar, D.A., & Younes, C. (2018). A GIS approach based on user location

to evaluate a bike-sharing program. *DYNA (Colombia)*, 85(204), 257–263.
<http://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.67670>