

**PROPUESTA DE LINEAMIENTOS DE USOS DE LA MALLA VIAL
BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL Y SIMULACIÓN BASADA EN
AGENTES PARA LA LOCALIDAD DE CHAPINERO (UPZ EL REFUGIO
Y CHICÓ LAGO) EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ.**

VIVIANA MARCELA VELANDIA LARA

**Universidad de La Sabana
Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas
Chía, Colombia
2023**

**PROPUESTA DE LINEAMIENTOS DE USOS DE LA MALLA VIAL
BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL Y DE SISTEMA
MULTIAGENTES PARA LA LOCALIDAD DE CHAPINERO (UPZ EL
REFUGIO Y CHICÓ LAGO) EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ.**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para obtener el título de

MAGÍSTER EN GERENCIA DE OPERACIONES
(Modalidad de Profundización)

VIVIANA MARCELA VELANDIA LARA

Director

DR. VASCO ANDRÉ BARBOSA BRANDAO

Co-director

DR. JOSÉ FERNANDO JIMÉNEZ GORDILLO

Universidad de La Sabana

Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas

Chía, Colombia

2023

DEDICATORIA

*A mi familia, mis padres y mis hermanas, y a
Juan, de quienes recibí la fuerza y la
determinación de desarrollar este proyecto,
quienes siempre han creído en mis
capacidades y me dan su apoyo
incondicional.*

AGRADECIMIENTOS

Es esta la oportunidad quiero expresar mis agradecimientos a la Universidad de la Sabana, por darme la oportunidad de participar de este programa de maestría, por entregarme todas las herramientas y retarme a realizar grandes proyectos.

A los profesores Vasco André Barbosa y Jose Fernando Jiménez por toda su asesoría, por sus importantes aportes, revisiones y comentarios; y especialmente por su paciencia, por el arduo y detallado acompañamiento durante todo el proyecto.

VIVIANA VELANDIA LARA

Resumen:

La congestión, se evidencia en la mayoría de las medianas y grandes ciudades alrededor del mundo; América Latina no es la excepción, por ejemplo: Bogotá, Ciudad de México y Sao Paulo, se encuentran entre las ciudades más congestionadas a nivel mundial. Pueden considerarse diferentes contextos de esta congestión, como la urbana, interurbana, portuaria. Sin embargo, en este documento se profundiza en la congestión urbana vial, que según DMRB, es entendida como la situación en la que “la demanda de tráfico supera el rendimiento máximo sostenible de la vía”, por lo tanto, a mayor congestión vial, se interrumpe el flujo del tráfico; la velocidad promedio de la vía disminuye, se supera el límite sostenible del uso de la vía y se generan colas sobre la misma.

Entre los factores que pueden dar origen a la congestión vial, este estudio pretende evaluar ¿cómo se podría realizar una mejora significativa a la congestión y velocidad de desplazamiento de un área específica mediante la modificación de los lineamientos en el uso de la malla vial?, en este caso de estudio, sobre una de las zonas más congestionadas de la ciudad de Bogotá, la localidad de Chapinero, la cual es conocida por ser uno de los barrios comerciales más importantes de la ciudad, por la gran cantidad de oficinas, empresas, locales comerciales y centros de encuentros sociales que en ella habitan. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es generar mediante el análisis espacial en Space Syntax una propuesta de lineamientos de uso de la malla vial que, validado con un modelo de simulación basada en agentes, permitan disminuir la congestión vial y mejorar las velocidades urbanas en la localidad de Chapinero (UPZ El Refugio y Chicó Lago) de la ciudad de Bogotá.

La metodología empleada en esta investigación se basa en cuatro fases: en la primera fase se hace la caracterización detallada de la zona de estudio, en la segunda fase mediante el análisis del área en el software Space Syntax se diseña un modelo de lineamientos para la malla vial que permite mejorar las condiciones señaladas en la zona, en la tercera fase se construye un modelo de simulación multiagentes en el software Netlogo, para recrear los escenarios actual y propuesto con los nuevos lineamientos, y una cuarta fase en donde se realiza la validación del escenario mencionado a través del análisis de estadísticos descriptivos en las variables de congestión y velocidad. El resultado de esta investigación demuestra una disminución en la congestión de la zona, así como, un aumento de la velocidad de circulación. Esta aproximación demuestra que no solamente grandes inversiones en infraestructura son necesarias para dar solución a la congestión vehicular de una zona, sino que el adecuado análisis espacial es una herramienta útil y necesaria.

Palabras clave: Movilidad Urbana, Simulación, Sistema multiagentes, tráfico, Urbanismo, Planeación Urbana, análisis espacial, Space Syntax, Netlogo.

Abstract:

Road congestion is evident in most of the medium and large cities around the world; Latin America is not an exception, for example: Bogotá, Mexico City and Sao Paulo are among the most congested cities worldwide. Different contexts of this congestion can be considered, such as urban, interurban, port. However, this document delves into urban road congestion, which according to DMRB, is understood as the situation in which "traffic demand exceeds the maximum sustainable yield of the road", therefore, when the road congestion is higher, the traffic flow is interrupted; the average speed of the road decreases, the sustainable limit of the use of the road is exceeded and queues are generated on it.

Among the factors that can rise to road congestion, this study aims to evaluate, how a significant improvement could be made to the congestion and travel speed of a specific area by modifying the guidelines for the use of the road network? in this case study, in one of the most congested areas of the city of Bogotá, Chapinero, which is known for being one of the most important commercial neighborhoods in the city, due to the large number of offices, companies, commercial premises and centers of social encounters that inhabit it. Therefore, the objective of this research is to generate, through spatial analysis in Space Syntax, a proposal for guidelines for the use of the road network that, validated with an agent-based simulation model, allows reducing road congestion and improving urban speeds in the town of Chapinero (UPZ El Refugio and Chicó Lago) in the city of Bogotá.

The methodology used in this research is based on four phases: in the first phase, the detailed characterization of the study area is made, in the second phase, by analyzing the area in the Space Syntax software, a model of guidelines for the road mesh is designed that allows to improve the conditions indicated in the area, in the third phase a multi-agent simulation model is built in the Netlogo software, to recreate the current and proposed scenarios with the new guidelines, and a fourth phase where the validation of the mentioned scenario through the analysis of descriptive statistics is made. The result of this investigation shows a decrease in congestion in the area, as well as an increase in circulation speed. This approximation shows that not only large investments in infrastructure are necessary to solve the traffic congestion in an area, but also that adequate spatial analysis is a useful and necessary tool.

Key words: Urban Mobility, simulation, Multi-agent systems, urban traffic, Urbanism, Urban Planning, spatial analysis, Space Syntax, Netlogo.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1_INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Pregunta de investigación.....	4
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivos específicos	6
1.4. Justificación y alcance	6
1.5. Organización del Documento	9
Capítulo 2_ESTADO DEL ARTE Y REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	12
Capítulo 3. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	21
3.1 Localidad De Chapinero, Ciudad De Bogotá	21
3.2 Usos Zona de Estudio.....	23
3.3 Densidad de Ocupación de Espacios	28
3.4 Otras amenidades y datos de interés	29
3.5 Caracterización de Vías.....	30
3.6 Comportamiento de Tráfico.....	31
3.7 Cantidad de viajes y medios de transporte	35
3.8 Tratamiento de Datos y Aplicación Detallada a la Zona de Estudio.....	36
3.9 Diagrama de ciclos causales	43
Capítulo 4_DISEÑO DE PROPUESTA	49
4.1 Análisis Espacial: Space Syntax.....	49
4.1.1 Conectividad	50
4.1.2 Intermediación (Choice)	51
4.1.3 Integración.....	52
4.2 Propuesta de Lineamientos de Uso de Malla Vial.....	53
Capítulo 5 MODELO SIMULACIÓN MULTIAGENTES Y EXPERIMENTACIÓN	56
5.1 Definición Matemática del modelo	56
5.1.1 Definición de Agentes.....	57
5.1.2 Definición de Parámetros y Variables.....	57
5.2 Simulación	59

5.2.1	Simulación Basada en Agentes: Netlogo	60
5.2.2	Descripción detallada del Modelo de Simulación	61
5.2.3	Supuestos y Limitaciones del Modelo de Simulación	71
5.2.4	Consideraciones Especiales Para Simulación de Escenarios: Base vs Propuesta	72
5.3	Protocolo Experimental	74
5.3.1	Objetivo:	74
5.3.2	Materiales	75
5.3.3	Metodología	76
5.3.4	Escenarios e instancias	78
5.3.5	Indicadores de eficiencia	79
Capítulo 6. VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA		80
6.1	Resultados Escenario Base	80
6.1.1	Agentes en Movimiento	80
6.1.2	Agentes estáticos	86
6.2	Resultados Propuesta	97
6.2.1	Agentes en Movimiento	97
6.2.2	Agentes Estáticos	102
6.3	Comparación de medias y análisis de varianza (Anova)	111
6.3.1	DOMINGO	113
6.3.2	LUNES	115
6.3.3	MARTES	117
6.3.4	MIERCOLES	118
6.3.5	JUEVES	120
6.3.6	VIERNES	122
6.3.7	SÁBADO	124
6.3.8	CONSOLIDADO SEMANAL:	126
6.3.9	DISCUSIÓN	130
Capítulo 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		134
REFERENCIAS.....		137
ANEXOS		141
A.	ANEXO 1	141
B.	ANEXO 2	141
C.	ANEXO 3	141

D.	ANEXO 4	141
E.	ANEXO 5	141
F.	ANEXO 6	141
G.	ANEXO 7	141
H.	ANEXO 8	141
I.	ANEXO 9	141
J.	ANEXO 10	141
K.	ANEXO 11	142
L.	ANEXO 12	142
M.	ANEXO 13	142
N.	ANEXO 14	142
O.	ANEXO 15	142
P.	ANEXO 16	142
Q.	ANEXO 17	142

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Característica Urbanística Localidad de Chapinero.....	22
Tabla 2. Resumen de Porcentajes de acuerdo con los usos en la zona de estudio.	27
Tabla 3. Tipos y Cantidades de Viajes Diarios realizados en la ciudad de Bogotá.	35
Tabla 4. Tipos y Cantidades de Viajes Diarios realizados en la localidad de Chapinero, separando Origen y Destino.....	36
Tabla 5. Tipos y Cantidades de Viajes Diarios realizados en la zona de estudio, separando Origen y Destino	36
Tabla 6. Tipos y Cantidades de Viajes Semanales realizados en la zona de estudio, separando Origen y Destino.....	38
Tabla 7. Tipos y Cantidades de Viajes Semanales con Origen en la zona de estudio, separando la Zona o ZAT específica. Fuente: Elaboración propia a partir de (Movilidad, 2019) y (TomTom International, 2021)	39
Tabla 8. Tipos y Cantidades de Viajes Semanales con Origen en la zona de estudio, separando la Zona o ZAT específica. Fuente: Elaboración propia a partir de (Movilidad, 2019) y (TomTom International, 2021)	39
Tabla 9. Cálculos de Probabilidades para la generación de Tipos de Viaje de Acuerdo con la Subzona o ZAT determinada. Fuente: Elaboración Propia tomando la información de (Movilidad, 2019)	43
Tabla 10. Causas de la problemática del tráfico en Bogota.	44
Tabla 11. Listado y Descripción de Agentes del Modelo.	57
Tabla 12. Descripción de probabilidades de creación de agentes y de asignación de orígenes y destinos.	58
Tabla 13. Parámetros fijos de Crossroads.....	58
Tabla 14. Parámetros fijos de Roads.....	58
Tabla 15. Variables Adicionales del Modelo. Aplicación en Agentes y Roads.....	59
Tabla 16. Ejemplo de tabla de probabilidades de creación de automóviles durante cada hora del viernes.....	65
Tabla 17. Ejemplo de tabla de probabilidades de asignación de un ZAT como destino de automóviles de la zona de estudio para el viernes. Fuente: Elaboración Propia.....	68
Tabla 18. Resumen de datos de Encuesta de movilidad Bogotá 2019 para simulación Netlogo.....	77
Tabla 19. Resumen de datos de malla vial para simulación Netlogo. Fuente: Elaboración Propia	78
Tabla 20. Escenarios e instancias simuladas Fuente: Elaboración Propia	78
Tabla 21. Resumen de indicadores de eficiencia a evaluar en cada simulación.	79
Tabla 22. Agrupación de vías en Zonas de análisis. Fuente: Elaboración Propia.....	87
Tabla 23. Agrupación de Franjas Horarias. Fuente: Elaboración Propia.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo recorrido en vehiculo particular, hora pico.	3
Figura 2. Ejemplo recorrido peatonal, hora pico.....	4
Figura 3. Organización de Documento de Investigación.	9
Figura 4. Clasificación de los algoritmos dinámicos de planeación de rutas.....	13
Figura 5. Mapa de la ciudad de Bogotá. En morado, localidad de chapinero.....	21
Figura 6. Mapa de la localidad de Chapinero dividida por UPZ, en Morado El Refugio, En Rojo Chicó Lago.	22
Figura 7. Usos de acuerdo con el POT. Disponible en detalle en el Anexo 1.	23
Figura 8. Usos Actuales de Primer Piso o Nivel. Disponible en detalle en el Anexo 2.....	24
Figura 9. Usos Actuales de Segundo Piso (Nivel) en adelante. Disponible en detalle en el Anexo 3.....	25
Figura 10. Usos generales de Entorno de la zona de Estudio. Disponible en detalle en Anexo 4.	26
Figura 11. Zonas verdes del área de Estudio. Disponible en detalle en el Anexo 5.	27
Figura 12. Altura promedio de Edificaciones por Manzana. Disponible en detalle en Anexo 6.....	28
Figura 13. Parqueaderos y Estaciones de Transporte Público. Disponible en detalle en Anexo 7.	29
Figura 14. Caracterización de Vías. Disponible en detalle en Anexo 8.....	30
Figura 15. Comportamiento promedio de tráfico de Lunes a Viernes en hora Pico AM, de 6am a 9am. Disponible en detalle en Anexo 9. Fuente: Con base en Históricos de Google Maps, Elaboración Propia	31
Figura 16. Comportamiento promedio de tráfico de Lunes a Viernes en hora Pico PM, de 4pm a 8pm. Disponible en detalle en Anexo 10. Fuente: Con base en Históricos de Google Maps, Elaboración Propia	32
Figura 17. Comportamiento promedio de tráfico de Lunes a Viernes en hora Valle, franja diurna fuera de horas pico. Disponible en detalle en Anexo 11. Fuente: Con base en Históricos de Google Maps, Elaboración Propia.....	33
Figura 18. Comportamiento promedio de tráfico Fines de Semana Nocturno. Disponible en detalle en Anexo 12.....	34
Figura 19. Comportamiento promedio de tráfico Fines de Semana Diurno. Disponible en detalle en Anexo 13.	34
Figura 20. Porcentaje de Ocupación de Infraestructura Vial de Bogotá por días de la semana y horas del día.....	37
Figura 21. Datos de tráfico TomTom normalizados	38
Figura 22. Ejemplo de tabla de viajes peatonales con origen en la zona de estudio, discriminado por ZAT y hora del viernes. Fuente: Elaboración Propia tomando la información de (Movilidad, 2019) y TomTom (TomTom International, 2021)	40
Figura 23. Ejemplo de tabla de viajes en TAXI con origen en la zona de estudio, discriminado por ZAT y hora del viernes. Fuente: Elaboración Propia tomando la información de (Movilidad, 2019) y TomTom (TomTom International, 2021)	41
Figura 24. Ejemplo de tabla de viajes en SITP con origen en la zona de estudio, discriminado por ZAT y hora del viernes. Fuente: Elaboración Propia tomando la información de (Movilidad, 2019) y TomTom (TomTom International, 2021)	41

Figura 25. Ejemplo de tabla de viajes en Automóvil con origen en la zona de estudio, discriminado por ZAT y hora del viernes. Fuente: Elaboración Propia tomando la información de (Movilidad, 2019) y TomTom (TomTom International, 2021)	42
Figura 26. Ejemplo de Diagrama Causal.	43
Figura 27. Diagrama General de Ciclos Causales.....	45
Figura 28. Space Syntax: Conectividad (Connectivity) de zona de estudio y sus alrededores.....	50
Figura 29. Space Syntax: Intermediación (Choice) de zona de estudio y sus alrededores.	51
Figura 30. Space Syntax: Integración (Integration) de zona de estudio y sus alrededores.	52
Figura 31. Vías y zonas para incluir en la propuesta de modificación de lineamientos de Malla Vial. (En Magenta)	53
Figura 32. Diagrama esquemático de agentes de infraestructura en Netlogo. Fuente: Elaboración Propia	61
Figura 33. Diagrama esquemático de agentes de infraestructura en Netlogo. Fuente: Elaboración Propia	62
Figura 34. Proceso general desarrollado en el software de simulación Netlogo. Fuente: Elaboración Propia	62
Figura 35 Diagrama Entidad - Relación de Agentes en Simulación Netlogo. Disponible en detalle en el Anexo 15.....	63
Figura 36. Procesos de Inicialización de Parámetros, Visualización y Variables en Netlogo.....	64
Figura 37. Procesos de Creación de Agentes en Movimiento en Netlogo. Fuente: Elaboración Propia	66
Figura 38. Subprocesos de Creación de Agentes en Movimiento en Netlogo. Fuente: Elaboración Propia	67
Figura 39. Descripción de atributo Route de Mover, el cual consiste en un vector de Crossroads.	67
Figura 40. Vías con circulación de Buses en la Zona de Estudio (en azul en imagen). Todas son compartidas con otro tipo de vehículos, excepto la Cra 7, la cual tiene un carril dedicado para buses. Fuente: Mapas Bogotá. Rutas Zonales del SITP. Bogotá D.C. Año 2021 (bogota.gov.co)	69
Figura 41. Proceso para el Movimiento de Agentes en Netlogo. Fuente: Elaboración Propia	70
Figura 42. Proceso de Actualización de variables globales en Netlogo. Fuente: Elaboración Propia	70
Figura 43. Gráfica y descripción de variables para cálculo de posibles valores de velocidad de cada Mover dentro de la simulación en Netlogo. Fuente: Elaboración Propia	71
Figura 44. Comparación de cambio de la infraestructura vial para las vías con servicio de buses. Base vs Propuesta. Fuente: Elaboración Propia	73
Figura 45. Comparación de cambio de la infraestructura vial para las vías que se sugiere peatonalizar en la propuesta. Base vs Propuesta. Fuente: Elaboración Propia	74
Figura 46. Netlogo, versión y detalles de sistema. Fuente: (Wilensky, 1999).....	75
Figura 47. Módulos y versiones CMD y Jupyter Notebook. Fuente: Anaconda Software Distribution. Computer software.....	75
Figura 48. Anaconda Navigator, version y detalle de sistema.	75
Figura 49. Detalles de la máquina utilizada para la realización de las simulaciones y procesamiento de todos los datos. Fuente: Extraído de informaciones de sistema de la máquina.	76
Figura 50. Proceso general de simulación de escenarios (1 semana completa).....	77
Figura 51. Velocidades promedio de todos los tipos de vehículos, registrados en Domingo, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.....	81
Figura 52. Velocidades promedio por tipos de vehículos, registrados en Domingo, por franjas de hora. .	81

Figura 53. Velocidades promedio de todos los tipos de vehículos, registrados en lunes, por franjas de hora.	82
Figura 54. Velocidades promedio por tipos de vehículos, registrado en lunes, por franjas de hora.	83
Figura 55. Velocidades promedio de todos los tipos de vehículos, registrados en Viernes, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.....	83
Figura 56. Velocidades promedio por tipos de vehículos, registrados en Domingo, por franjas de hora...	84
Figura 57. Velocidades promedio para todos los tipos de vehículos, registrados para toda la semana, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.	85
Figura 58. Comparación de velocidades promedio semanales por franjas de hora, en rojo resultados de la simulación Base, en azul información de la base de datos de TomTom. Fuente: Elaboración Propia, con información (TomTom2023, 2023).	86
Figura 59. Segmentación de la zona de estudio por zonas. Fuente: Elaboración Propia.....	87
Figura 60. Índice de congestión; rangos y equivalencias. Fuente: Elaboración Propia.....	88
Figura 61. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario AM de Domingo. Fuente: Elaboración Propia.....	89
Figura 62. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario LUNCH de Domingo. Fuente: Elaboración Propia.....	89
Figura 63. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario PM de Domingo.	90
Figura 64. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario NIGHT de Domingo. Fuente: Elaboración Propia.....	90
Figura 65. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario AM de lunes. .	91
Figura 66. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario LUNCH de lunes.	91
Figura 67. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario PM de lunes...	92
Figura 68. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario NIGHT de lunes.	92
Figura 69. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario AM de viernes.	93
Figura 70. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario LUNCH de viernes.....	93
Figura 71. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario PM de viernes.	94
Figura 72. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario NIGHT de Viernes.	94
Figura 73. Velocidades promedio percibida en vías con circulación de Buses por zonas, por franjas de hora.	95
Figura 74. Velocidades promedio percibida en vías con circulación de Others por zonas, por franjas de hora.	95
Figura 75. Congestion promedio percibida en vías con circulación de Buses por zonas, por franjas de hora.	96
Figura 76. Congestion promedio percibida en vías con circulación de Others por zonas, por franjas de hora.	96

Figura 77. Velocidades promedio de todos los tipos de vehículos en propuesta, registrados en Domingo, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.....	98
Figura 78. Velocidades promedio por tipos de vehículos en propuesta, registrados en Domingo, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.....	98
Figura 79. Velocidades promedio de todos los tipos de vehículos en propuesta, registrados en lunes, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.....	99
Figura 80. Velocidades promedio por tipos de vehículos en propuesta, registrados en lunes, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.....	99
Figura 81. Velocidades promedio de todos los tipos de vehículos en propuesta, registrados en Viernes, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.....	100
Figura 82. Velocidades promedio por tipos de vehículos en propuesta, registrados en viernes, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.....	101
Figura 83. Velocidades promedio por todos los tipos de vehículos, en propuesta, por franjas de hora. ..	101
Figura 84. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario AM de Domingo. Fuente: Elaboración Propia.....	102
Figura 85. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario LUNCH de Domingo. Fuente: Elaboración Propia.....	103
Figura 86. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario PM de Domingo. Fuente: Elaboración Propia.....	103
Figura 87. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario NIGHT de Domingo. Fuente: Elaboración Propia.....	104
Figura 88. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario AM de lunes. Fuente: Elaboración Propia.....	104
Figura 89. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario LUNCH de lunes. Fuente: Elaboración Propia.....	105
Figura 90. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario PM de lunes. Fuente: Elaboración Propia.....	105
Figura 91. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario NIGHT de lunes. Fuente: Elaboración Propia.....	106
Figura 92. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario AM de Viernes. Fuente: Elaboración Propia.....	107
Figura 93. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario LUNCH de Viernes. Fuente: Elaboración Propia.....	107
Figura 94. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario PM de viernes. Fuente: Elaboración Propia.....	108
Figura 95. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario NIGHT de viernes. Fuente: Elaboración Propia.....	108
Figura 96. Velocidades promedio percibida en vías con circulación de Buses por zonas, por franjas de hora.	109
Figura 97. Velocidades promedio percibida en vías con circulación de Others por zonas, por franjas de hora.	109
Figura 98. Congestionamientos promedio percibida en vías con circulación de Buses por zonas, por franjas de hora.	110

Figura 99. Congestion promedio percibida en vías con circulación de Others por zonas, por franjas de hora.	110
Figura 100. Ejemplos de Tablas de Comparación de Medias (Base vs Propuesta), ala izquierda de agentes en movimiento, a la derecha de agentes estáticos, correspondientes al día Viernes. Fuente: Elaboración Propia.....	112
Figura 101. Resumen de comparación de medias de velocidad de agentes en movimiento para el domingo.	114
Figura 102. Resumen de comparación de medias de velocidad y congestión promedio en vías para el domingo.	115
Figura 103. Resumen de comparación de medias de velocidad de agentes en movimiento para el lunes.	116
Figura 104. Resumen de comparación de medias de velocidad y congestión promedio en vías para el lunes.	116
Figura 105. Resumen de comparación de medias de velocidad de agentes en movimiento para el martes.	117
Figura 106. Resumen de comparación de medias de velocidad y congestión promedio en vías para el martes.	118
Figura 107. Resumen de comparación de medias de velocidad de agentes en movimiento para el miércoles.	119
Figura 108. Resumen de comparación de medias de velocidad y congestión promedio en vías para el miércoles.	120
Figura 109. Resumen de comparación de medias de velocidad de agentes en movimiento para el jueves.	121
Figura 110. Resumen de comparación de medias de velocidad y congestión promedio en vías para el jueves.	122
Figura 111. Resumen de comparación de medias de velocidad de agentes en movimiento para el viernes.	123
Figura 112. Resumen de comparación de medias de velocidad y congestión promedio en vías para el viernes.	124
Figura 113. Resumen de comparación de medias de velocidad de agentes en movimiento para el sábado.	125
Figura 114. Resumen de comparación de medias de velocidad y congestión promedio en vías para el sábado.	126
Figura 115. Variación de velocidades promedio por todos los tipos de vehículos, base VS propuesta, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.	127
Figura 116. Variación de velocidades promedio en vías dedicadas a Buses, base VS propuesta, por franjas de hora.....	127
Figura 117. Variación de velocidades promedio en vías dedicadas a Others, base VS propuesta, por franjas de hora.....	128
Figura 118. Variación de congestiones promedio en vías dedicadas a Buses, base VS propuesta, por franjas de hora.....	128
Figura 119. Variación de congestiones promedio en vías dedicadas a Others, base VS propuesta, por franjas de hora.....	129

LISTA DE PUBLICACIONES

Publicación en Proceso: (Velandia Lara, 2023)

Velandia Lara, V. (2023). Propuesta de lineamientos de usos de la malla vial basado en el análisis espacial y simulación basada en agentes para la localidad de chapinero (UPZ El Refugio y Chicó Lago) en la ciudad de Bogotá. *Urban Studies Journal*.

Capítulo 1.

INTRODUCCIÓN

La cantidad de personas que se concentran en las ciudades principales de cada país, así como su nivel de vida han aumentado en todo el mundo, incrementando la infraestructura de transporte público y el uso de vehículos privados, si bien esto viene incrementando la experiencia y calidad de viaje de las personas, también ha provocado un aumento de congestión en el flujo de tráfico de las zonas urbanas (Duowei, Jianping, Ming, Ziheng, & Kezhen, 2020).

Actualmente, el tráfico vehicular es uno de los principales problemas de las ciudades. Este problema reduce las velocidades de circulación, produciendo incrementos en el tiempo de viaje y, además, está directamente asociado al aumento de demoras, uso ineficiente del combustible y el incremento de la polución atmosférica (Bull, 2003). Según INRIX, el congestionamiento ha afectado dramáticamente la población, la economía, la infraestructura, la proliferación de viajes compartidos y servicios de entrega. Además, según el estudio realizado por esta empresa en el 2020, Bogotá es la octava ciudad con peor tráfico de 200 ciudades estudiadas, con aproximadamente 272 horas perdidas en el tráfico (Reed, 2019).

De acuerdo con las últimas encuestas de percepción ciudadana (Vamos O. B., 2019) y la encuesta movilidad urbana del 2019 (Urbana.), los bogotanos no se sienten satisfechos con la movilidad de la ciudad. Se tiene un sistema de transporte masivo cuya capacidad es insuficiente para la demanda de los habitantes de la ciudad, sistemas masivos adicionales como el metro o el tranvía que aún se encuentran en fases de diseño y pre-construcción, lo cual puede empezar a tener un impacto positivo en la ciudad hasta finales de la década de 2020's, no se cuenta con una infraestructura adecuada para el volumen de vehículos particulares que circulan en las calles, la mayoría de las vías (vehiculares y peatonales) no se encuentran en sus óptimas condiciones, son muy pocas las zonas que cuentan con alternativas amigables, sustentables y económicas como estaciones de bicicletas, ni vehículos eléctricos, etc. Sin mencionar el gran problema de seguridad que se vive

en todos los escenarios públicos de la ciudad, en promedio un 57% de los perciben la ciudad como insegura (Vamos O. B., 2018).

Según Duowei et al. (2020), tradicionalmente se han implementado dos tipos de soluciones para abordar los problemas de congestión del tráfico, retrasos en los viajes y emisiones de vehículos. - El primer tipo de solución sugiere incrementar la infraestructura vial mediante la expansión de carreteras, que puede implicar costos elevados y es demasiado estática para abordar los rápidos cambios en las condiciones del tráfico. -El segundo tipo de solución, más confiable y efectiva, exige optimizar la eficiencia de la estructura vial actual y los recursos existentes.

Existen diferentes iniciativas y programas que maneja directamente el Distrito de Bogotá para tratar de mitigar estas condiciones, por ejemplo, el sistema de transporte masivo se encuentra en constante evaluación e implementación de medidas correctivas, se encuentra en proceso el proyecto de diseño y construcción del metro de Bogotá, se tienen diversos proyectos de mejoramiento de infraestructura, se tienen medidas de restricción para la circulación de vehículos públicos y particulares. Sin embargo, a los ojos de la opinión pública y a los testimonios que día a día entregan los ciudadanos, estas medidas parecen insuficientes, alrededor del 60% de los ciudadanos percibe que los tiempos de desplazamiento van incrementando con el tiempo (Vamos O. B., 2019).

Zonas de alto tráfico por su concentración de centros empresariales, estudiantiles y comerciales, no cuentan con las vías de acceso necesarias, ni con el flujo apropiado de acceso al transporte público y en ocasiones ni siquiera con espacios peatonales adecuados para el flujo de personas que requieren transitar por estas áreas. Al margen de los proyectos que el Distrito pueda estar manejando, se hace evidente la necesidad de una alternativa que implique el no depender de un proyecto de infraestructura a largo plazo o de proyectos de altísima inversión que pueden dejar de ser viables.

1.1. Planteamiento del problema

De acuerdo con la Encuesta de Movilidad, realizada por la Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá en el 2019 (Movilidad, 2019), en la ciudad de Bogotá se realizan 13.359.728 viajes al día, considerando como viaje cualquier tipo de desplazamiento, bien sea a pie (superior a 15 minutos)

o en algún tipo de vehículo público o privado, de los cuales 1.757.314 se realizan en la localidad de Chapinero. Es importante considerar que esta localidad representa cerca del 4.43% del área de la ciudad de Bogotá y según este número de viajes, Chapinero está concentrando el 13.5% de la totalidad de los viajes de la ciudad.

Así mismo, pueden identificarse dentro de la localidad de Chapinero, dos Unidades de planeamiento zonal (UPZ El Refugio y Chicó Lago) que concentran el 45% de los viajes de la localidad. Es por esto que se identifican estas zonas como críticas, específicamente entre la Calle 72 y la Calle 100, entre la Carrera 7 y la Autopista Norte.

Adicionalmente, de acuerdo con la encuesta de percepción ciudadana realizada por la Organización Bogotá Cómo Vamos en el 2018, se encontró que en promedio en la ciudad de Bogotá el 60% de las personas perciben que sus trayectos habituales “duran más tiempo” con respecto al año anterior, específicamente el 62% de los habitantes de la localidad de Chapinero tienen esta misma sensación, cifras que han ido incrementando con el paso de los años.

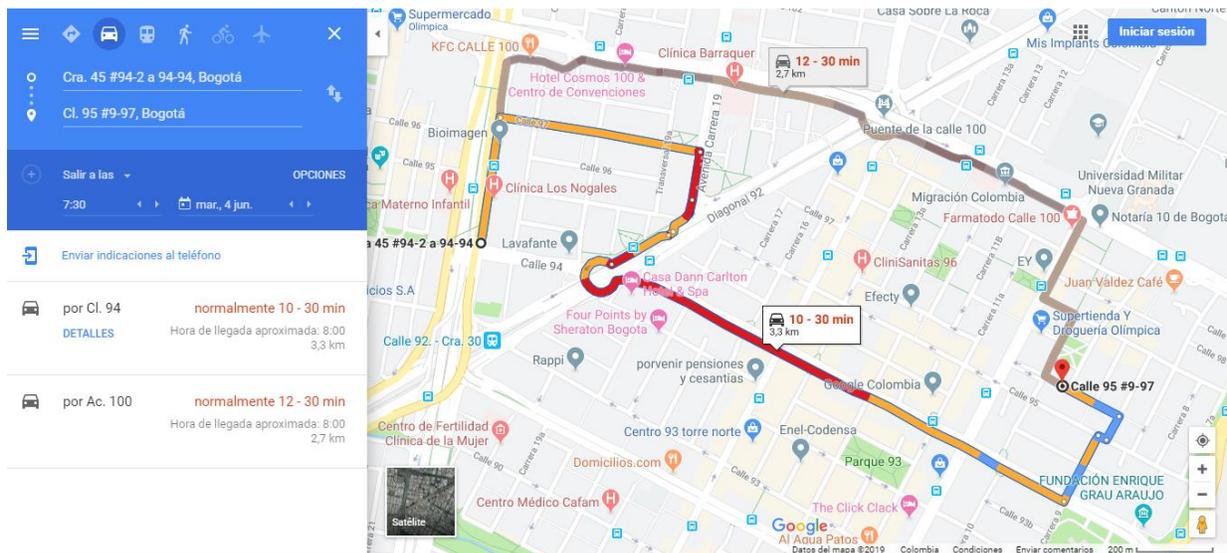


Figura 1. Ejemplo recorrido en vehículo particular, hora pico.
Fuente. GoogleMaps®

Empíricamente, se han realizado mediciones en las que se ha encontrado que para recorridos vehiculares (particulares y públicos) entre 2km y 3km dentro de esta zona, especialmente en horario pico, pueden llegar a transcurrir entre 20 y 40 minutos. Así mismo, las estaciones del sistema de transporte masivo Transmilenio se encuentran en promedio a esa misma distancia.

A modo de ejemplo, con los datos históricos recolectados por GoogleMaps®, en la Figura 1, se muestra un recorrido típico de 2.7km dentro de esta localidad en hora pico, para el cual se presentan 2 alternativas que pueden tomar hasta 30 minutos en vehículo particular.

Por otro lado, se aplica el ejemplo para el mismo recorrido, ahora a pie, y se evidencia en la Figura 2 un promedio de 1.8km con un tiempo estimado de 24 minutos.

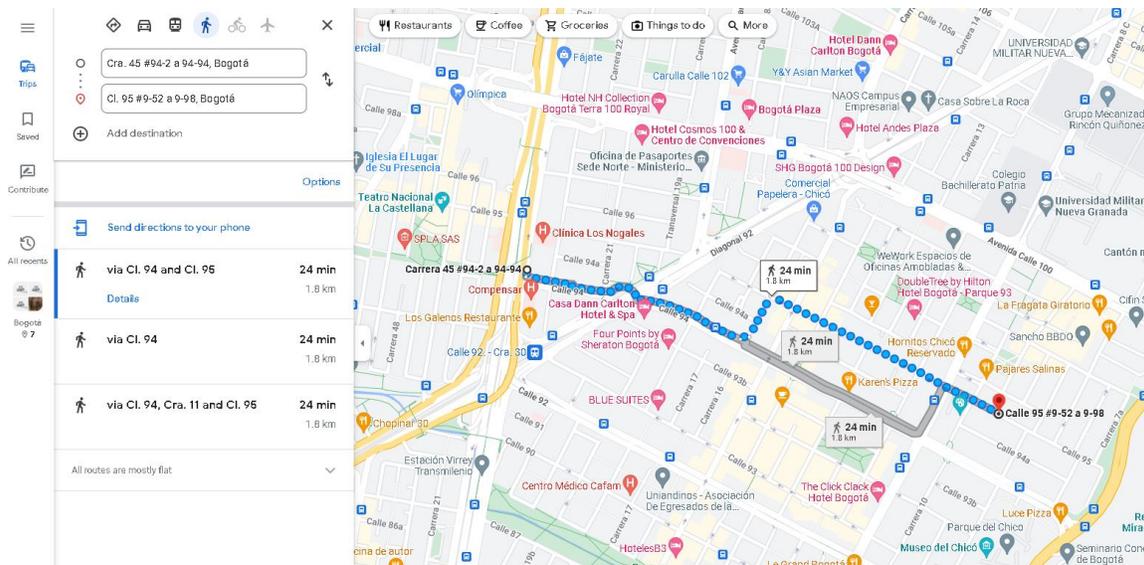


Figura 2. Ejemplo recorrido peatonal, hora pico.
Fuente: GoogleMaps®

Adicionalmente, no se cuenta con amplias zonas peatonales, ni un significativo número de ciclorutas que faciliten los accesos alternativos a la zona.

Teniendo en cuenta las problemáticas descritas anteriormente se plantea este proyecto de investigación, buscando caracterizar adecuadamente la zona para entender los flujos de movimiento de personas y poder plantear una posible propuesta de movilidad que mejore las condiciones de congestión y velocidad de desplazamiento en la zona, caso localidad de Chapinero (UPZ El Refugio y Chicó Lago) en la ciudad de Bogotá.

1.2. Pregunta de investigación

De acuerdo con Velasquez (2015). La movilidad urbana, puede definirse como la suma de desplazamientos a través de diferentes medios, los cuales tienen unas condiciones de uso,

características sociales, y de los que los ciudadanos hacen uso para acceder a los servicios necesarios para el quehacer diario. Actualmente, el mayor desafío de la movilidad está en superar la disminución progresiva del uso transporte público, su impacto ambiental y las deficiencias que estos derivan: pérdida de pasajeros y el crecimiento de uso del automóvil o motocicleta. (Velasquez M., 2015).

Sin embargo, lo que es bueno en una ciudad puede no ser efectivo en otras. No existen fórmulas universales para solucionar los problemas de transporte. Lo que sí está ampliamente estudiado y definido es que las políticas de transporte deben estar dirigidas a la búsqueda de una accesibilidad, sostenibilidad, desarrollo económico y equidad, en todo tipo de ciudades bien industrializadas o en vía de desarrollo (OECD, 2002)

Autores como Velasquez (2015), sugieren que “debe adoptarse siempre un enfoque integrado, ninguna solución individual puede resolver un problema de esta complejidad. Por tanto, se necesita actuar coordinadamente sobre las infraestructuras, el material móvil, las innovaciones tecnológicas, la regulación de los servicios, la competencia entre operadores y la vigilancia de las condiciones en que se prestan los servicios”, y este enfoque requiere “la integración de los servicios, a través de un ente planificador con competencias sobre todos los modos y, si es posible, que regule la ordenación de usos del suelo. Solo así se puede tener una visión de red de transporte, en la que cada modo tendrá unos fines específicos y complementarios del resto”.

De acuerdo con estos autores, se plantea la hipótesis que el problema de la congestión y la velocidad promedio de desplazamiento en el área de estudio podría solucionarse realizando una evaluación transversal de su situación de movilidad urbana, determinando sus condiciones particulares y planteando una alternativa integral que modifique los usos actuales de sus vías, dando prioridad al transporte público, a los corredores peatonales y a usos de medios alternativos. La pregunta de investigación de este trabajo es:

¿Cómo se podría realizar una mejora significativa a la congestión y velocidad de desplazamiento de un área específica mediante la modificación de los lineamientos en el uso de la malla vial?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Generar mediante el análisis espacial en Space Syntax una propuesta de lineamientos de uso de la malla vial que, validado con un modelo de simulación basada en agentes, permitan disminuir la congestión vial y mejorar las velocidades urbanas en la localidad de Chapinero (UPZ El Refugio y Chicó Lago) de la ciudad de Bogotá

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la movilidad de la zona de estudio entendiendo sus usos actuales, recursos disponibles, actores principales, sus diferentes interrelaciones y sus problemáticas principales.
- Diseñar mediante el análisis espacial en Space Syntax, un modelo de lineamientos de modificación de usos de la malla vial que permita disminuir la congestión e incrementar las velocidades de desplazamiento en la zona de estudio.
- Construir un modelo de sistemas multiagentes que permita validar la propuesta de modificación de lineamientos de usos viales diseñada.
- Evaluar y validar el modelo propuesto mediante el uso de la estadística descriptiva en las variables de congestión y velocidad de circulación vial.

1.4. Justificación y alcance

De acuerdo con (ITDP, 2011), “la movilidad está relacionada con la libertad de moverse y la posibilidad de acceso a los medios necesarios para tal fin, es decir, una movilidad relacionada con el deseo del individuo de alcanzar determinado destino y la capacidad del individuo. El reto es resolver estas necesidades de movilidad de manera compatible y eficiente con la preservación del medio ambiente”.

Cuando se habla de movilidad sostenible, se parte de la definición dada por la Organización de la Cooperación y Desarrollo Económico (OECD, 2002), “como un sistema de transporte

ambientalmente sustentable que no perjudica a sus habitantes o el ecosistema, que satisfaga las necesidades de desplazamiento de sus habitantes”.

Por lo tanto, los proyectos de movilidad deben plantearse desde una estrategia urbana integral, sistémica, que apunte a las características de la movilidad futura, pensada desde un punto de vista ambiental, que resuelva la necesidad de desplazamiento, desde los efectos negativos que producen el uso de los medios de transportes privados. De esta manera, debe priorizar el transporte público colectivo, corredores y zonas peatonales, núcleos urbanos de altas densidades y desarrollos de ambientes comunitarios (Velasquez M., 2015).

Al buscar una alternativa de solución de movilidad, que modifique los usos de la malla vial para mejorar las condiciones de congestión y velocidad de desplazamiento de la zona de estudio, se deben considerar herramientas matemáticas y de simulación que permitan probar los escenarios posibles. Existen sin número de métodos que buscan resolver diversos problemas complejos de múltiples variables, por ejemplo, las metaheurísticas son algoritmos independientes de problemas de alto nivel que proporcionan un conjunto de pautas y estrategias para desarrollar algoritmos de optimización heurística. Algunos de los ejemplos más notables de metaheurísticas son los algoritmos genéticos, búsqueda tabú, evolutivos, de búsqueda, recocido simulado y optimización de colonia de hormigas. (Sörensen, 2013). Para los sistemas inteligentes de tráfico el tipo de metaheurística más usada es la optimización de colonia de hormigas.

Una de las principales variables de un entorno urbano es el tráfico, este crea sistemas dinámicos muy complejos ya que involucra interacciones no lineales entre muchos agentes independientes con un comportamiento muy autónomo, estas interacciones pueden llevar a situaciones que produzcan diversos problemas en el mismo. Por ejemplo, un embotellamiento puede ocurrir cuando un grupo de vehículos se encuentra atorado por un conductor especialmente lento, entre un enorme número de causas y posibilidades. (Alqurashi, 2019).

Para este tipo de escenarios, un método de simulación particularmente efectivo es el basado en agentes, el cual considera sistemas complejos como descentralizados, es una manera de optimización de soluciones individuales y esta aplica a sistemas de agentes individuales que interactúan y son autónomos, este tipo de simulación es usada para modelar sistemas complejos a través de múltiples contextos, incluyendo sistemas biológicos y sociales. Mientras que los agentes

en el sistema descentralizado no tienen información directa acerca de la condición global de la red, tienen información local acerca de sus vecinos inmediatos y su entorno. En esta medida, ellos pueden usar colectivamente este conocimiento para construir un sistema cooperativo. En lugar de describir el estado del sistema entero, un modelo basado en agentes representa los componentes individuales del sistema y sus comportamientos. La aplicación de estos sistemas ha sido exitosa en un amplio rango de escenarios incluyendo entrenamientos militares, evacuación de edificaciones y el análisis de juegos digitales. La implementación de modelos basados en agentes para el análisis de sistemas sociales complejos, que involucran procesos espacio-temporales como la dinámica del tráfico y la congestión se ha hecho más común y se evidencia como altamente efectiva para optimizar estos flujos (Klügl & Bazzan, 2012).

Los sistemas multi-agentes son flexibles, lo que connota la capacidad de responder correctamente a situaciones dinámicas y autónomas, es decir, los agentes son capaces de programar sus propias acciones y el entorno tiene la capacidad de agregar fácilmente nuevas funcionalidades al sistema. En adición es tolerante a fallas debido a lo cual, si por alguna razón alguna parte del sistema falla, el sistema puede cumplir con su objetivo de diseño sin afectar el resultado (McArthur, 2007).

Las alternativas de análisis y simulación antes mencionadas presentan diferentes metodologías para la solución de problemas de tráfico en las ciudades. Sin embargo, el principal desafío que estas presentan es medir el impacto que tendrían estas soluciones en la realidad. En esta medida, debido a que uno de los beneficios de usar modelos con multi-agentes es que toman en cuenta la dinámica del ambiente de estudio y pueden mejorar sus condiciones evaluando el comportamiento de los diferentes agentes (Leticia, 2016), este proyecto desarrollará la propuesta de mejora de las condiciones de congestión y velocidad de desplazamiento de las UPZ 88 y 97 de la localidad de Chapinero, de la ciudad de Bogotá, mediante el uso de simulaciones multi-agente.

1.5. Organización del Documento

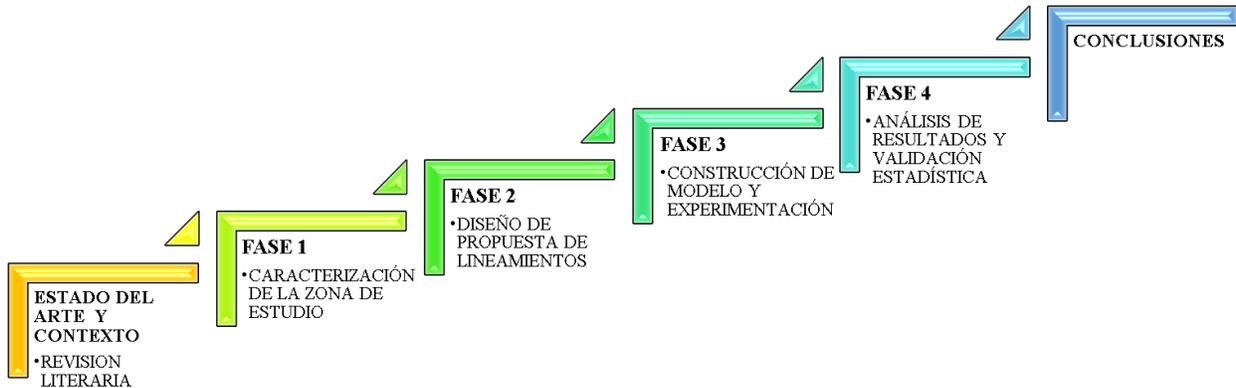


Figura 3. Organización de Documento de Investigación.
Fuente: Elaboración Propia.

Luego de la presente introducción, proceso de planteamiento del problema y definición del alcance de la investigación (Capítulo 1), el documento inicia con capítulo de revisión literaria y luego con cuatro capítulos principales sobre la metodología de desarrollo y cierra con las conclusiones, como se detalla a continuación y se evidencia de manera esquemática en la *Figura 3*:

- En el segundo capítulo se realiza la revisión literaria donde se estudia cómo se ha venido abordando el problema de tráfico urbano a lo largo de los últimos 30 años y se realiza una breve descripción de las soluciones parciales aplicadas a la fecha, concentradas en: mejoras a los sistemas de señalización, avances en el desarrollo de problemas VRP, aproximaciones matemáticas a través de optimizaciones, aplicaciones con heurísticas, sistemas híbridos entre optimización/heurísticas, métodos alternativos como Teoría de Juegos, aplicaciones tecnológicas de los ITS (Intelligent Transportation Systems), soluciones centralizadas y descentralizadas, así como arquitecturas híbridas, desarrollos a través de simulaciones multi-agentes, evoluciones de éstas últimas con tecnologías colaborativas. Concluyendo como práctica viable para el presente ejercicio la aplicación de simulaciones multi-agentes.

En los siguientes cuatro capítulos describe en detalle la metodología de desarrollo del proyecto:

- En el tercer capítulo se realiza la caracterización de la zona de estudio, para aplicar de manera muy completa los parámetros de la simulación, personalizando el área de estudio con todas las variables posibles y así poder tener resultados muy cercanos a la realidad, este capítulo pretende documentar toda la información disponible y aplicable con la cual se han programado las simulaciones realizadas. Usos del espacio, densidad de ocupación de las edificaciones, ubicación de amenidades como zonas verdes, estaciones de transporte público, parqueaderos, caracterización de la infraestructura vial disponible, una fotografía del promedio del tráfico en las diferentes horas del día y la semana y cifras de la cantidad y tipos de viajes realizados en la zona, adicionalmente, se presenta un tratamiento de datos y una aplicación realizada para poder utilizar el detalle de datos de tráfico en la simulación. Finalmente se presenta un diagrama de ciclos causales que pretende definir usos actuales, recursos disponibles, actores principales y sus diferentes interrelaciones. Todo lo anterior como entrada para el siguiente capítulo.
- En el cuarto capítulo se describe el diseño de un modelo de lineamientos de modificación de usos de la malla vial, donde se realiza una evaluación de la zona de estudio mediante la herramienta de análisis espacial Space syntax, se identifican algunas de las principales oportunidades y realizar una propuesta de modificación de lineamientos de usos viales de la zona de estudio en Bogotá, esta propuesta es probada mediante simulación en los capítulos siguientes para demostrar posibles mejoras en la velocidad de circulación y la congestión del sistema evaluado.
- En el quinto capítulo se realiza la construcción de Modelo de Simulación y Experimentación, se detalla cómo se realizó elaboró el modelo de sistemas multiagentes, mediante el cual se validó la propuesta de modificación de lineamientos viales diseñada. Describiendo su diseño y aplicación, así como, el proceso de experimentación realizado en el cual se plantearon diversos escenarios, instancias e indicadores de medición.

- En el sexto capítulo se realiza un análisis detallado de los resultados obtenidos en el proceso de simulación, del escenario referencia que describe la condición actual de la zona de estudio y del escenario que incluye la propuesta de modificación de lineamientos de uso de la malla vial. Así mismo, se realiza la validación de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la estadística descriptiva en las variables de congestión y velocidad de circulación vial.

Finalmente, el documento cierra con las conclusiones del proyecto de investigación y con las recomendaciones para futuras investigaciones.

Capítulo 2.

ESTADO DEL ARTE Y REVISIÓN DE LA LITERATURA

La intención de la presente revisión literaria consiste en destacar algunas de las problemáticas relativas a la movilidad urbana y el creciente tráfico generado en ella, así como los métodos utilizados a la fecha para su mejora y justificar la decisión del modelo de simulación utilizado en este proyecto.

El problema del tráfico urbano ha sido ampliamente tratado desde mediados del siglo XX, los trabajos de los últimos 30 años empezaron involucrando algoritmos matemáticos muy complejos (Como SCOOT en Inglaterra, SCAT en Australia) que mejoraron las condiciones del tráfico en muchos países. Sin embargo, han sufrido un manejo ineficaz de las condiciones emergentes del tráfico, debido a la falta de adaptabilidad y flexibilidad en tiempo real (Chiu, 1992), especialmente cuando ocurren intervenciones humanas indeseables como accidentes o eventos importantes.

Luego a principios del siglo XXI, precisamente con la dinámica tan cambiante y creciente del tráfico, se enfocaron en el tema de la semaforización, evaluando sistemas que pretendían resolver problemas de optimización dinámica en tiempo real, como el Sistema Efectivo Distribuido de Optimización Jerárquica en Tiempo Real (RHODES) (Mirchandani & Head, 2001), los cuales sufrieron una complejidad exponencial que impidió su implementación a gran escala (Dujardin, Vanderpooten, & Boillot, 601-610), así como el algoritmo adaptativo de la cola más larga primero (LQF), que a pesar de ser bastante robusto eligiendo dejar que la dirección con el mayor número

de coches sea verde, puede ser injusto con los vehículos que esperan en una cola corta que no pueden acumular la longitud suficiente para ser programados (Wu, D., Zhang, & N., 896-909).

Más tarde, buscando hacer más realista la simulación del espacio vial, Hallé et al. (2004), evaluaron sistemas multi-agentes con el fin de crear una coordinación entre los actores viables, bajo principios de colaboración, para obtener información y anticiparse a eventos en la vía. Propusieron un modelo jerárquico para abordar el problema de coordinación de un grupo de vehículos, apoyados en tecnologías ITS (Intelligent Transportation Systems).

Presentaron un sistema de conducción colaborativo, que utilizaba vehículos equipados con un sistema de guía longitudinal y lateral, dichos vehículos eran manejados por grupos con un líder determinado y respetando la jerarquía de este, cada grupo era considerado un agente diferente con capacidades de toma de decisiones diferentes. Esta investigación se valoró como una base para empezar a trabajar cada vehículo de manera autónoma, sin un líder en particular, donde éste no necesariamente deba estar equipado con el mismo sistema que los demás. Haciendo que cada vez más los entornos simulados sean más parecidos a la realidad y sea posible tomar decisiones de mejora de las redes y condiciones viales en tiempo real (Hallé, Laumonier, & Chaib-Draa, 2004).

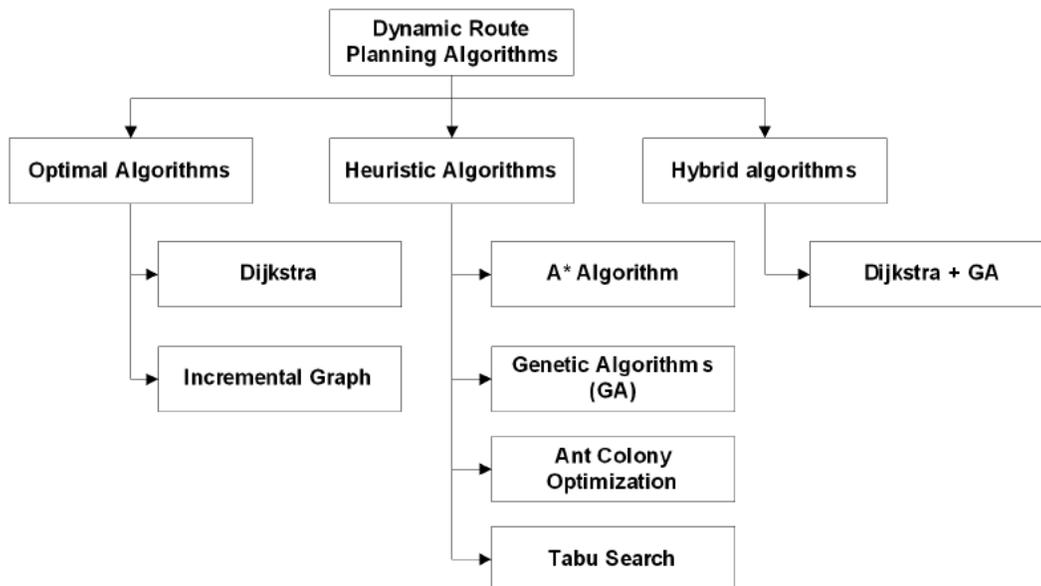


Figura 4. Clasificación de los algoritmos dinámicos de planeación de rutas.

Fuente: (Nha, Djahel, & Muurphy, 2012)

Con esta misma intención de colaboración, (Manvi & Kakkasageri, 2006), propusieron una red ad-hoc de información vehicular que consta de una arquitectura de red de tres niveles que utiliza tecnología Multi-Agent System (MAS) y se apoya también en tecnologías inteligentes para comunicación y evaluación en tiempo real.

Por otro lado, en la industria del transporte, la distribución y la logística, se han desarrollado técnicas para encontrar una ruta óptima desde un punto de partida hasta un destino en un mapa de carreteras, centrándose en atender a varios clientes mediante varios vehículos. Estas técnicas de planificación de rutas son conocidas bajo el nombre de Vehicle Routing Problems VRP y de acuerdo con el nivel de profundidad deseado pueden involucrar variables de congestión de tráfico, de incidentes en la vía, entre otras (Nha, Djahel, & Muurphy, 2012).

De acuerdo con Nha et al. (2012), las principales técnicas VRP pueden clasificarse en tres categorías principales de acuerdo con la técnica utilizada para explorar el espacio de soluciones como se muestra en la *Figura 4* estas tres categorías son: enfoques basados en algoritmos óptimos, enfoques basados en heurística y enfoques híbridos.

De acuerdo con Nha et al. (2012), la clasificación planteada se describe a continuación:

- “Los algoritmos óptimos garantizan encontrar la solución óptima global a través de la exploración de todo el conjunto de soluciones disponibles.
- Los enfoques basados en heurística exploran un subconjunto de las soluciones disponibles y generalmente encuentran una solución óptima aproximada que tiene cualidades cercanas a las de la óptima global.
- Los algoritmos basados en enfoques híbridos aprovechan las fortalezas de ambos enfoques anteriores.

Los algoritmos óptimos más comunes son Dijkstra y el de Incremental Graph. Encuentran el camino más corto de un nodo a cualquier otro nodo de la red de carreteras. Los enfoques basados en heurística incluyen A *, algoritmo genético, optimización de colonias de hormigas y búsqueda tabú. Para reducir el tiempo de cálculo durante el proceso de búsqueda, aceptan la mejor ruta

posible bajo ciertas restricciones (tiempo, espacio de búsqueda, etc.) La última categoría combina enfoques tanto óptimos como heurísticos.”

En el mismo año, Nha et al. (2012), hicieron simulaciones en un software especializado de movilidad urbana (SUMO, paquete TRACI) con el fin de estudiar y comparar el rendimiento de los diferentes algoritmos de planificación de rutas descritos, en redes de carreteras reales y los clasificó según los mecanismos utilizados para buscar las mejores rutas encontrando como óptimo para su caso la combinación de Dijkstra (algoritmo de ruta más corta) con la metaheurística de algoritmos genéticos. Sin embargo, la desventaja de estos algoritmos aparece cuando se desean aplicar a redes más grandes y situaciones globales, ejemplo: todos los vehículos en una red de tráfico de una ciudad determinada, o incluso de porciones de esta. Así mismo, este tipo de aproximaciones no permite predecir el comportamiento individual de cada uno de los actores de la red, como vehículos, peatones, etc.

De igual modo, Camacho J., Medina S. & Terán O. (2012), desarrollaron un modelo multi-agente que simula el tráfico de automóviles en una intersección de la ciudad de Mérida. En el sistema se tuvieron en cuenta distintos tipos de vehículos, así como también, comportamientos propios de los conductores (agresivos y pasivos), se simularon distintos escenarios y como resultado se obtuvo una reducción de infracciones y peligro en el cruce.

Otros autores, como Groot (2013) buscaron minimizar el tiempo total que pasan los vehículos en la red vial mediante la aplicación de Teoría de Juegos, en este caso aplicando métodos de solución sistemáticos para el juego Stackelberg inverso. En particular para Groot (2013: “el juego se reformula en el contexto de la elección de ruta, donde la autoridad vial puede obtener la distribución óptima del tráfico del sistema en un entorno dinámico mediante el uso de funciones de líder que asignan un incentivo monetario positivo o negativo a cada elección de ruta o tiempo de viaje deseado de cada grupo homogéneo de conductores. Tras la elección del par de elección de ruta deseada o tiempo de viaje y el incentivo monetario asociado que ingresa el seguidor en una computadora a bordo, el conductor es asignado a una ruta deseada por la autoridad vial.”

Se encuentran mejoras en los tiempos de desplazamiento. Sin embargo, no es posible considerar todas las variables y diversos agentes del espacio vial. El desarrollo es bastante conceptual y

requiere una estructura centralizada de toma de decisiones, lo cual aún se aleja un poco la realidad aplicable el tráfico urbano (Groot, 2013).

Un año después se retoman los planteamientos anteriores de las ITS y según Boskovich (2014), debido al rápido desarrollo de la tecnología, las ITS son capaces de adaptar nuevas técnicas en la adquisición y distribución de datos viales que pueden proporcionar a los conductores una mayor conciencia de la red de carreteras. Al hacerlo, esto les proporciona la capacidad de mejorar el proceso de toma de decisiones sobre las mejores rutas a seguir. De aquí surgen dos alternativas para la administración de los sistemas: la primera de forma que contempla un manejo centralizado de la adquisición y procesamiento de datos, y la segunda una técnica donde el procesamiento se realiza dentro de cada vehículo, así como la captura de datos de la red a través de los vehículos individuales. A partir de esto, el conductor puede seleccionar rutas alternativas que le sean más propicias en lugar de simplemente utilizar un dispositivo que le proporcione los mejores datos sin importar las rutas que sigan otros vehículos. Al permitir que el conductor tome una decisión "más informada", los conductores pueden reducir el impacto de las demoras en las rutas cuando ocurren incidentes.

Profundizando en las diferencias entre soluciones distribuidas y centralizadas, la opción centralizada requiere una gran infraestructura que demanda constante actualización y mantenimiento. Sin embargo, el uso de una solución distribuida alivia estos desafíos, pero debe tenerse en cuenta que inicialmente, todos los participantes deben estar dispuestos a entregar datos a sus vecinos e implementar las soluciones deseadas calculadas por el vehículo. Además, es necesario que haya una densidad de vehículos suficiente para distribuir los datos entre sí. Se podría argumentar que se podría implementar una combinación de un método centralizado y descentralizado que superaría las deficiencias del método distribuido, pero a costa de mantener algún tipo de infraestructura (Nakamura & Yamazaki, 2014).

Bajo estos argumentos, Boskovich (2014) comparó la efectividad de arquitecturas centralizadas y descentralizadas para simular problemas de tráfico y examinó y comparó el efecto de estas en la movilidad del transporte cuando ocurren accidentes. Sin embargo, este trabajo presentó solo un enfoque multi-agente convencional para implementar una solución general para vehículos en una

arquitectura distribuida. Así que el siguiente paso en este caso, implicaría un mayor desarrollo de la noción de interacción del vehículo mediante la cooperación. La idea de la interacción del agente se vuelve vital para comprender el alcance de una solución distribuida de tipo multi-agente; sin embargo, debido a la cantidad de carga que se coloca en una solución centralizada, la solución distribuida cooperativa es más aceptable (Boskovich, 2014).

En este mismo año, se realizan estudios sobre aplicaciones de mejora al flujo vehicular como, Castán A., Ibarra S., Laira J, Guzmán J & Castán E. (2014), desarrollaron un modelo basado en agentes autónomos e inteligentes capaces de manipular las fases de los ciclos de tiempos de acuerdo con sus exigencias y limitaciones. En adición, las horas pico fueron tomadas en cuenta y como resultado se obtuvo una mejor fluidez vehicular.

Asimismo, Loarte R. & Quizhpe B. (2015), desarrollaron y simularon un sistema multi-agente con el objetivo de que los semáforos se comuniquen entre ellos y logren tomar decisiones de manera autónoma. Los semáforos se comunican cuando se produce un evento inesperado, marcan así el mapa dando la posibilidad al usuario de evitar los semáforos con eventos inesperados y trazar una ruta hacia su lugar de destino, reduciendo tiempo del trayecto.

Debido al constante avance de la tecnología, otros autores continúan profundizando en el uso de ITS, teniendo en cuenta que el volumen de información que se estaría creando y administrando en tiempo real es también un tema de discusión. Yean & Wang (2016) llevaron a cabo un estudio preliminar de la tecnología blockchain y diseñaron un modelo para construir sistemas de gestión de transporte paralelo. Plantean que Blockchain se puede utilizar para establecer un ecosistema ITS autónomo seguro, confiable y descentralizado, creando un mejor uso de la infraestructura y los recursos ITS heredados, especialmente efectivo para la tecnología de crowdsourcing (colaboración abierta), presentaron un caso de estudio para servicios de viajes compartidos en tiempo real basados en blockchain. (Yuan & Wang, 2016)

Otros ejemplos de cómo se ha manejado el problema de tráfico de peatones, se realizó en una investigación que propuso un enfoque multiescala para predecir el tráfico y el flujo de multitudes durante eventos públicos, en este caso por ejemplo, se definieron múltiples escalas de volumen de

personas para determinar cómo actuar en cada caso, definiendo diferentes modelos de acuerdo a la escala. Sin embargo, presenta múltiples oportunidades al no poder definir los peatones como agentes específicos y así no es posible predecir su comportamiento (Biedermann, et al., 2016).

En este mismo año continúan aplicándose simulaciones multi-agentes para buscar mejora en las condiciones ambientales, Higuera Arias (2016) obtuvo como resultado una disminución en el tiempo de espera y reducción de la emisión del CO₂ mediante el desarrollo y simulación de una metodología multi-agente para el control adaptativo de la semaforización de una malla vial, basándose en el aprendizaje por refuerzo, para que el sistema de control por medio de una interacción directa con el tránsito encuentre una política óptima que disminuya la congestión vehicular, los tiempos de espera y el impacto ambiental.

Por otra parte, Feliciani et al. (2017) define que dentro de otras variables que afectan el tráfico urbano, se encuentran la ubicación de los cruces peatonales y en esta medida realizaron una investigación que buscaba desarrollar una herramienta que permitiera evaluar la necesidad de introducir un nuevo paso de peatones y/o un semáforo, en este caso se introdujo un modelo para la simulación de cruces viales no señalizados donde existe una interacción directa entre el tránsito peatonal y vehicular. El tráfico se modeló aplicando un modelo de seguimiento continuo de automóviles utilizando las ecuaciones de Gipps, y se utilizó un modelo Cellular Automata para simular el movimiento de los peatones.

Es importante señalar que el modelo desarrollado en el marco de dicha investigación es representativo de los fenómenos observados durante un estudio de campo en la ciudad de Milán. Esto significa que, aunque en general el comportamiento de los peatones no cambiará en gran medida en los diferentes países, la precisión del modelo puede verse limitada si, por ejemplo, se encuentran altas tasas de incumplimiento en los conductores o el tráfico está compuesto por un gran número de 2- vehículos de ruedas. (Feliciani, et al., 2017)

Retomando investigaciones en MAS, Bandini et al. (2017) mediante la implementación de un sistema multi-agente, buscaron reproducir las condiciones de tráfico observadas en varios países

(Japón, Reino Unido, Italia, Estados Unidos) y analizaron los efectos potenciales de la sobrecarga del sistema en la comodidad y seguridad de los usuarios de la vía.

Concluyeron que la dinámica de los modelos y sistemas basados en agentes proporcionan un marco para enfrentar problemas complejos relacionados con la gestión de las ciudades del futuro, como el transporte y la movilidad. Una vez validado contra datos empíricos, el uso de simulaciones basadas en agentes permite visualizar y analizar fenómenos complejos, no directamente accesibles desde el mundo real, en un esquema predictivo y explicativo. El sistema heterogéneo general se compuso de dos tipos de agentes (es decir, agentes de vehículos y peatones) (Bandini, Crociani, Feliciani, Gorrini, & Vizzari, 2017).

También, Pérez C. & Ramos H. (2017), identificaron las relaciones entre el comportamiento vehicular y la ocupación de vías y, posteriormente, desarrollaron un modelo multi-agente del comportamiento de los vehículos en la ciudad de Bogotá D.C

Así mismo, pueden incluirse variables adicionales como las colisiones en la red vial, Riaz y Niazi (2017) realizaron también un estudio para para modelar la detección y evitación de colisiones en carreteras urbanas congestionadas mediante el uso de sistemas multi-agentes.

Un año después, Orozco H, Lazcano S & Landassuri V. (2018), desarrollaron un sistema de control inteligente basado en agentes autónomos, buscando balancear los tiempos de espera en luz roja y luz verde para agilizar el flujo. El sistema fue desarrollado con la topología de Manhattan y se obtuvo como resultado una mejor fluidez vehicular.

En este mismo año, Nacht J., Falco M. & Robiolo G. (2018), desarrollaron una simulación basada en agentes cuyo objetivo es reducir el tiempo de espera de los conductores en una intersección de calles; se modelaron vehículos particulares, taxis, peatones y un semáforo inteligente que evalúa los pesos de los flujos en las direcciones X y Y. Además, se desarrollaron diferentes escenarios de simulación y se obtuvo como resultado la reducción del tiempo de cola.

Recientemente, Alqurashi (2019) redujo los tiempos de desplazamiento en la vía utilizando Cellular Automation y simulando el escenario a través de Multi Agent System.

En el 2020 se retoman estudios de una de las herramientas más evaluadas como lo es, el control de las señales de tráfico para mejorar la eficiencia operativa y la seguridad del tráfico en las intersecciones. (Duowei, Jianping, Ming, Ziheng, & Kezhen, 2020). De esta estrategia se derivan múltiples niveles de aplicación, desde la coordinación y sincronización previa de los semáforos de una misma vía o zona

De acuerdo con esta revisión literaria realizada, y de acuerdo con la forma como se han venido abordando los problemas de tráfico a nivel mundial en los últimos años, se decide simular el comportamiento de la zona de estudio a través de una simulación multi-agente.

Capítulo 3.

CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

De acuerdo con el primer objetivo específico la intención del presente capítulo es caracterizar la zona de estudio, presentando las generalidades y datos más relevantes de la misma, definiendo sus usos actuales, recursos disponibles, actores principales y sus diferentes interrelaciones. Al caracterizar las principales variables de la zona se realiza un diagnóstico del sistema, confirmando la problemática de investigación planteada y permitiendo diseñar soluciones viables que serán detalladas en el siguiente capítulo.

3.1 Localidad De Chapinero, Ciudad De Bogotá

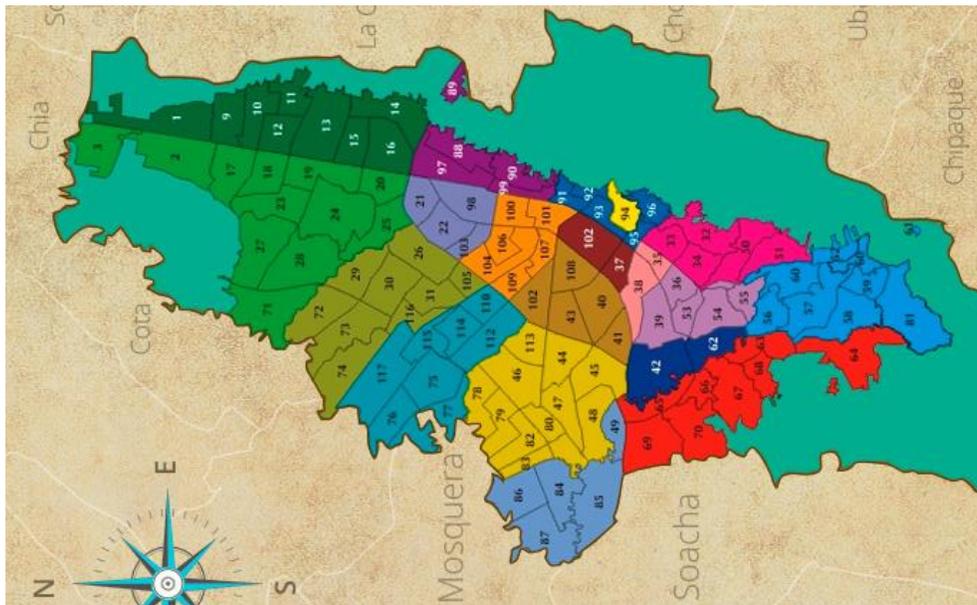


Figura 5. Mapa de la ciudad de Bogotá. En morado, localidad de chapinero.
Fuente: (CCB, 2019)

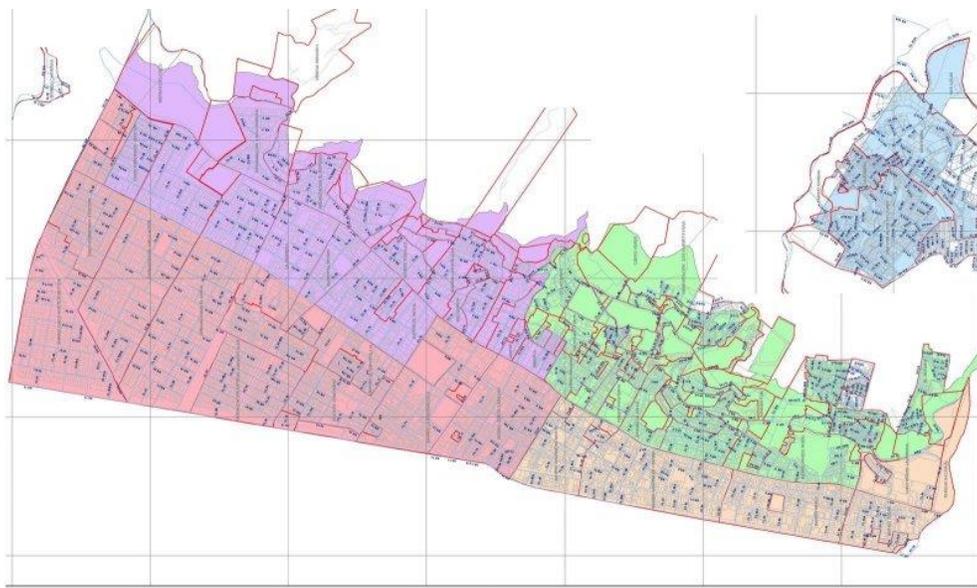


Figura 6. Mapa de la localidad de Chapinero dividida por UPZ, en Morado El Refugio, En Rojo Chicó Lago.
Fuente (*Chapinero, 2019*)

La localidad de Chapinero está ubicada en el centro-orientado de la ciudad (En morado en la *Figura 5*) y limita, al norte, con la calle 100 y la vía a La Calera; por el occidente, el eje vial Autopista Norte-Avenida Caracas; en el orientado, las estribaciones del páramo de Cruz Verde, la Piedra de la Ballena, el Pan de Azúcar y el cerro de la Moya, crean el límite entre la localidad y los municipios de La Calera y Choachí. El río Arzobispo (calle 39) define el límite de la localidad al sur, con la localidad de Santa Fe. Chapinero tiene una extensión total de 3.898,96 hectáreas con un área rural de 2.664,25 ha (68%) y un área urbana de 1.234,71 ha (32%).

Tabla 1. Característica Urbanística Localidad de Chapinero.
Fuente: Fuente (*Instituto de Cultura, 2019*).

Nº	UPZ	Característica Urbanística	Área/Hab.	Población	Decreto reglamentario de la norma urbanística
88	EL REFUGIO	RESIDENCIAL CUALIFICADO	336.06	32,336	059 del 14 de Febrero de 2007
89	SAN ISIDRO PATIOS	RESIDENCIAL DE URBANIZACIÓN INCOMPLETA	113.01	8,101	Pendiente definición de cerros orientales
90	PARDO RUBIO	RESIDENCIAL CONSOLIDADO	273.98	26,554	614 del 29 de Diciembre de 2006
97	CHICO LAGO	COMERCIAL	422.39	32,992	059 del 14 de Febrero de 2007
99	CHAPINERO	COMERCIAL	164.83	19,916	468 del 20 de Noviembre de 2006

Como puede evidenciarse en la *Figura 6*, la localidad cuenta con cinco UPZ: Chapinero 99, San Isidro Patios 89, Pardo Rubio 90, El Refugio 88, Chicó Lago 97, en total 50 barrios. Para el objeto del presente estudio, se evaluarán las UPZ 88 y 97, las cuales, como se detalla en la *Tabla 3* y de acuerdo con la definición de usos establecida, pueden ser ocupadas con fines residenciales y comerciales respectivamente.

La zona de estudio, de acuerdo con lo planteado en la justificación del problema se encuentra abarcada por toda la UPZ Chicó Lago (97) y parcialmente por la UPZ El Refugio (88), específicamente entre las Calles 72 y 100 y las Carreras 7ma y autopista norte. Para el análisis detallado, el área de estudio se ha segmentado en 375 manzanas, en todos los planos siguientes, encerradas entre una línea roja. A continuación, se describirán los datos generales más relevantes de las mismas:

3.2 Usos Zona de Estudio

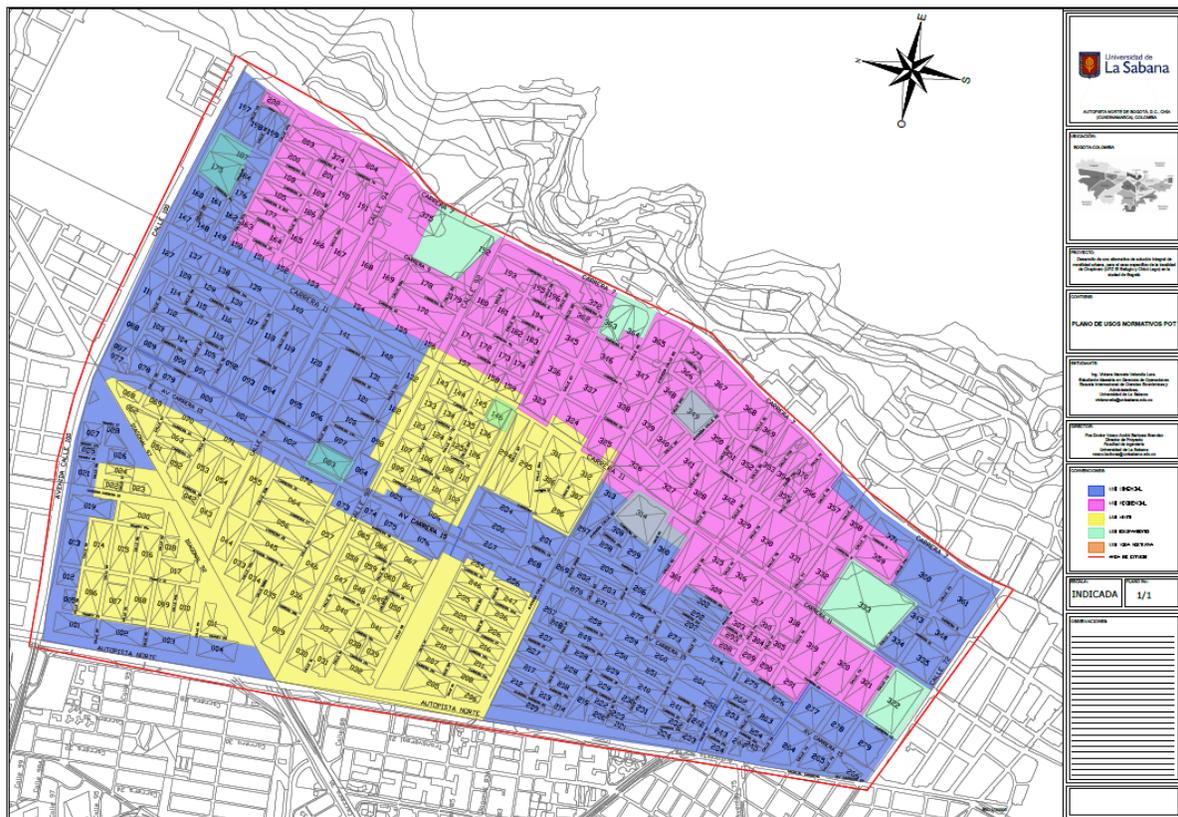


Figura 7. Usos de acuerdo con el POT. Disponible en detalle en el Anexo 1.
Fuente: Elaboración Propia en base a información oficial (Urbana.)

Inicialmente se parte desde la legislación Colombiana y puntualmente desde lo decretado en el plan de ordenamiento territorial de la ciudad de Bogotá. En base a la información disponible públicamente de la Secretaría Distrital de Planeación Urbana, se ha creado el mapa de la *Figura 7* en donde se define el Uso de la zona de estudio como MIXTO: cerca de un 43% de uso exclusivamente comercial (Azul Oscuro en la *Figura 7*), un 27% de uso exclusivamente residencial (Magenta en la *Figura 7*), aproximadamente un 28% de uso Mixto (Comercial + Residencial) (Amarillo en la *Figura 7*) y cerca de un 2% de uso de equipamientos (Hospitales, Colegios, centros culturales, etc.) (Azul Cyan en la *Figura 7*).



Figura 8. Usos Actuales de Primer Piso o Nivel. Disponible en detalle en el Anexo 2.
Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, como es evidente en el plano anterior, la información del POT es muy general, para poder incluir en la simulación a realizar, mejor detalle del uso de las diferentes zonas se ha realizado una segmentación de espacios en dos formas:

1. Segmentando los usos por frente de manzana, es decir en cada manzana es posible tener hasta 4 usos diferentes, entonces, en las *Figura 8* y *Figura 9* los planos presentan esta diferenciación.
2. Segmentando el primer piso de todas las edificaciones, de los segundos pisos en adelante. Es común encontrar usos mixtos en el mismo edificio, por lo que el análisis es más preciso contemplando esta diferencia. En la *Figura 8* se encontrará el detalle del uso del primer nivel, y en la *Figura 9* el promedio de los usos del segundo nivel en adelante.

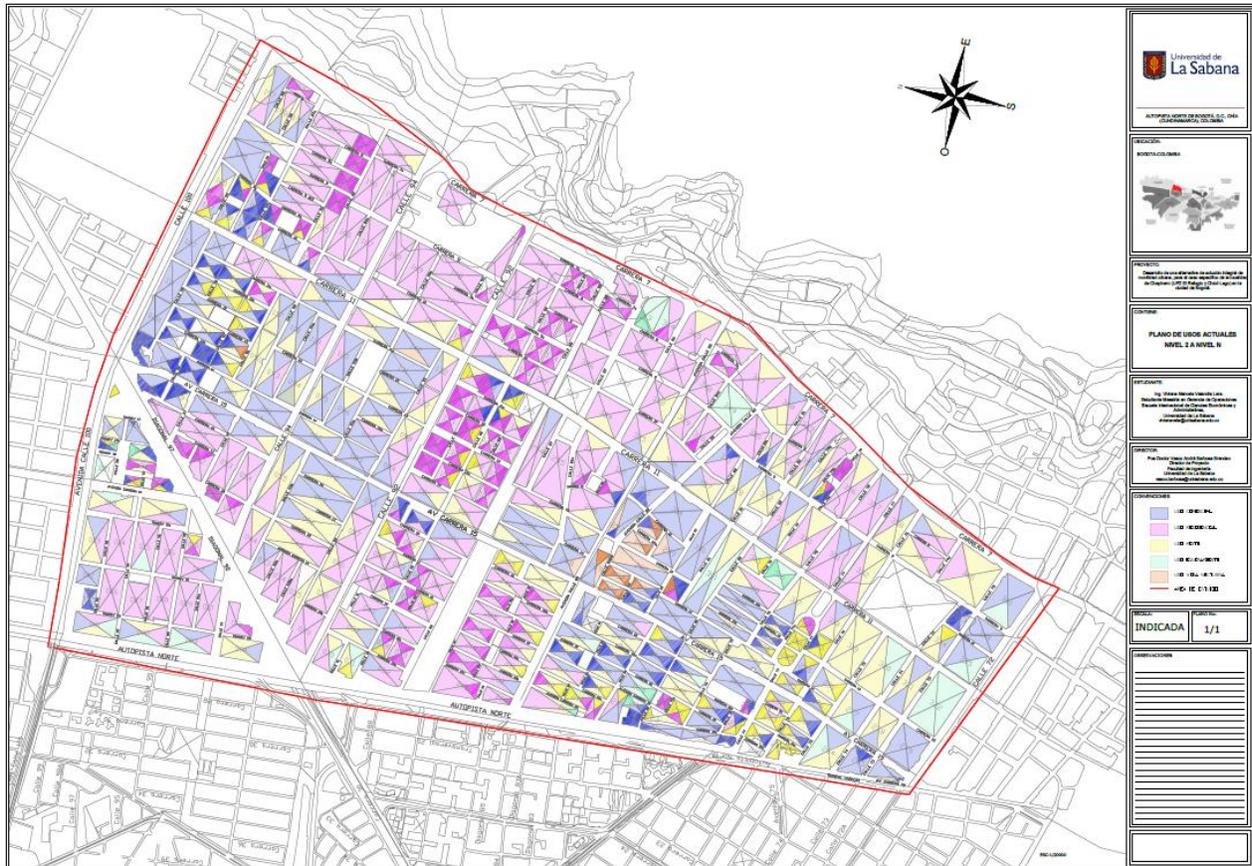


Figura 9. Usos Actuales de Segundo Piso (Nivel) en adelante. Disponible en detalle en el Anexo 3.
Fuente: Elaboración Propia

Estas informaciones presentadas en las *Figura 8* y *Figura 9* responden a un levantamiento presencial desarrollado para esta investigación, definiendo los usos de acuerdo con la realidad de la zona en la actualidad: comercial (Azul Oscuro), residencial (Magenta), mixto (comercial + residencial) (Amarillo), equipamientos (Azul Cian) y agregando uno nuevo “uso nocturno” (Naranja), el cual corresponde a zonas especiales de clubes, bares y discotecas que tienen operación nocturna y mueven grandes flujos de personas en horas adicionales a las pico y valle

diurnas. Las manzanas marcadas en blanco son espacios verdes, parques o zonas exteriores de uso común.

Así mismo, es muy importante considerar que el área de estudio hace parte de un entorno más grande del cual dependen sus flujos de movilidad, entorno que alimenta sus usuarios principales y también recibe usuarios de la zona de estudio. Por lo tanto, se ha definido un perímetro de entre 2 a 5 manzanas alrededor y de una forma más general se han estudiado sus usos actuales, para poder determinar en que proporciones fluiría la movilidad desde y hacia el exterior de la zona de estudio.

En la *Figura 10* puede apreciarse este levantamiento con las mismas convenciones de colores utilizadas en los planos de usos anteriores: comercial (Azul Oscuro), residencial (Magenta), mixto (comercial + residencial) (Amarillo), equipamientos (Azul Cyan) y uso nocturno (Naranja):

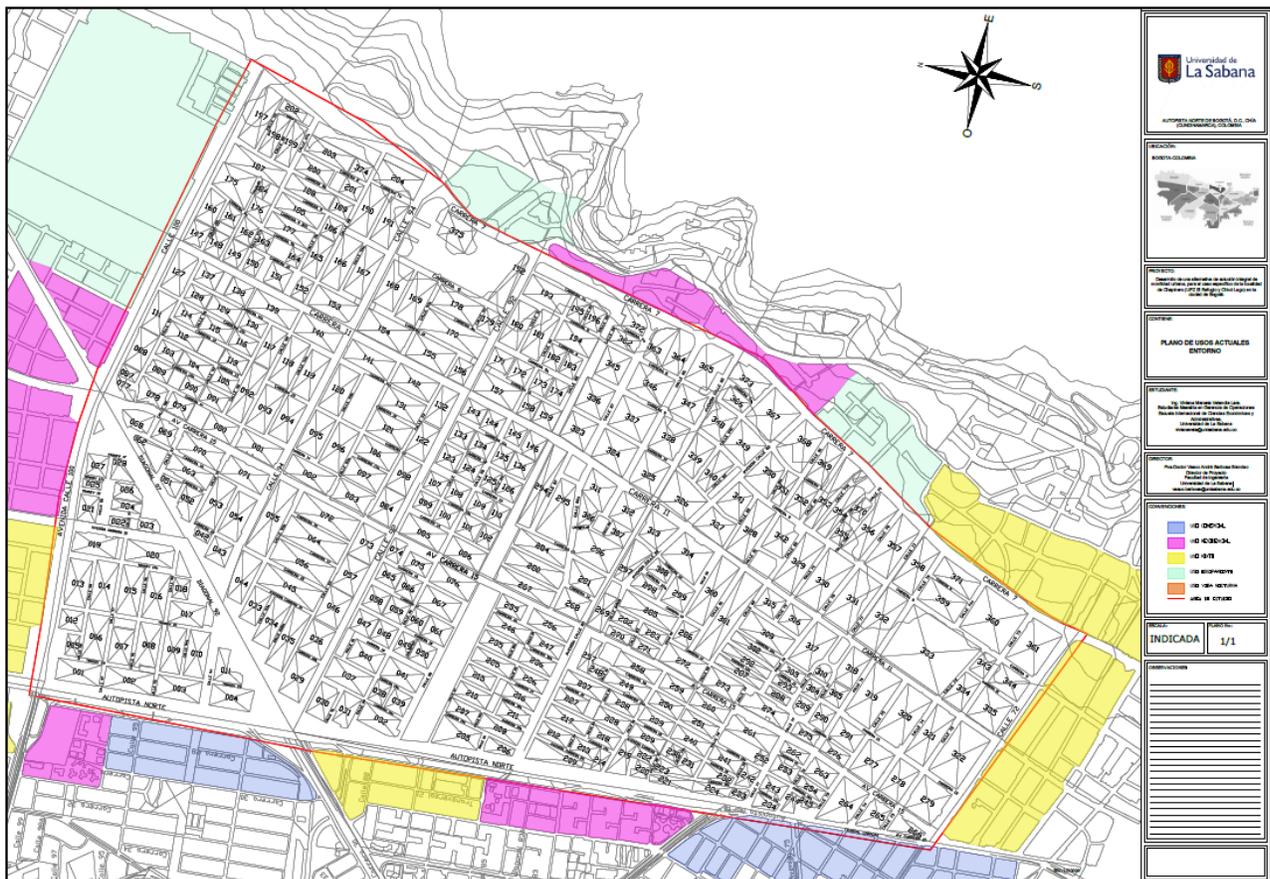


Figura 10. Usos generales de Entorno de la zona de Estudio. Disponible en detalle en Anexo 4.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Resumen de Porcentajes de acuerdo con los usos en la zona de estudio.
Fuente: Elaboración Propia.

	USO	POT	NIVEL 1	NIVEL 2	ENTORNO
C	COMERCIAL	42.8%	27.9%	30.3%	15.9%
R	RESIDENCIAL	26.6%	39.0%	41.9%	33.3%
M	MIXTO	28.3%	24.9%	20.1%	30.2%
E	EQUIPAMIENTOS	2.2%	6.3%	3.4%	20.6%
N	VIDA NOCTURNA	0.0%	1.9%	1.7%	0.0%

En conclusión, caracterizando los usos de los espacios de acuerdo con la realidad actual de la zona de estudio, se evidencia que la participación de los usos residenciales es mayor a lo estimado en el POT y así mismo, para algunas zonas que son comerciales en el primer nivel, son residenciales del segundo nivel hacia arriba. Estas medidas son de bastante utilidad para personalizar con mayor detalle los datos de entrada de la simulación a realizar. La expectativa es obtener una réplica lo más cercana posible a la realidad para poder tomar una efectiva decisión de mejora de los tiempos de desplazamiento a implementar.

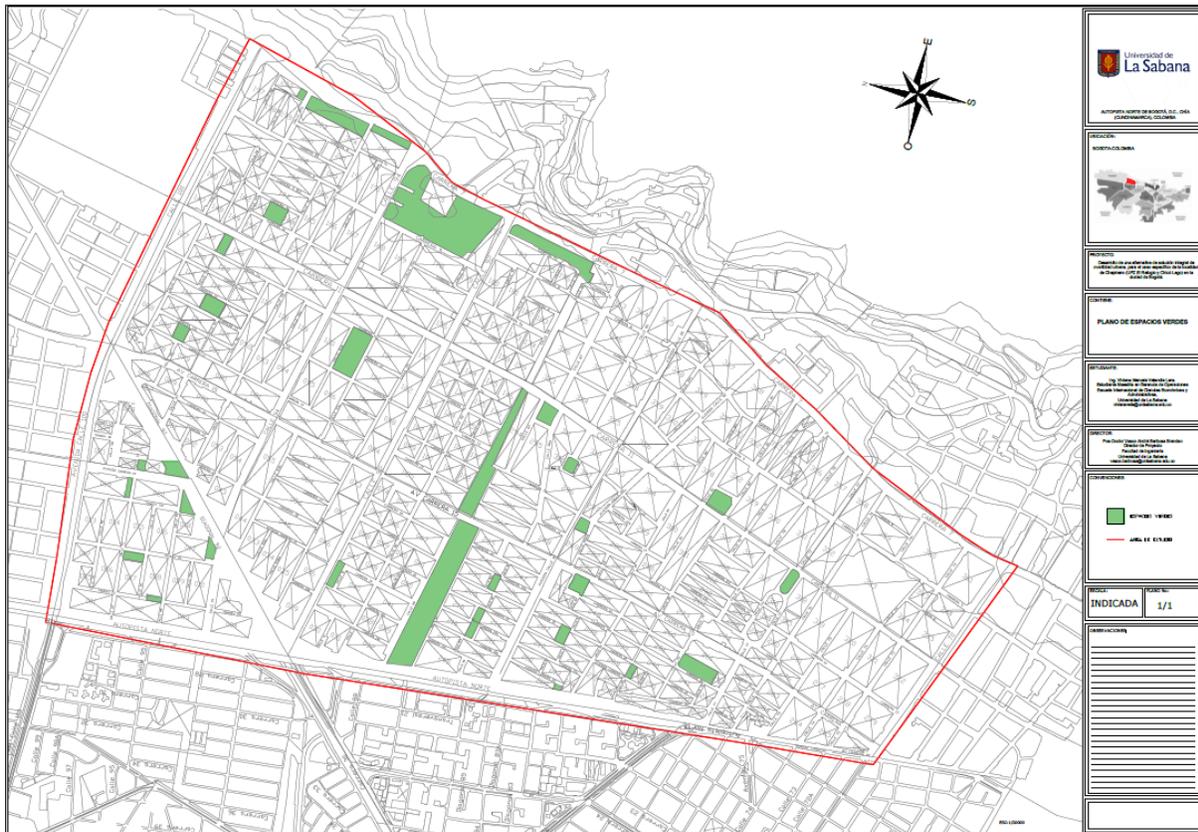


Figura 11. Zonas verdes del área de Estudio. Disponible en detalle en el Anexo 5.
Fuente: Elaboración Propia.

En resumen, en la Tabla 4 se encuentran detallados los porcentajes reales de los usos de las manzanas en el área de estudio y sus entornos, comparados con lo reglamentado en el POT

Como un dato adicional de entrada, es importante tener en cuenta que dentro del área de estudio existen zonas verdes que no están discriminadas en los planos anteriores y que también tienen un comportamiento de flujo de personas diferente en distintos horarios a lo largo del día. En la *Figura 11*, se evidencian en detalle la ubicación de estas zonas.

3.3 Densidad de Ocupación de Espacios



Figura 12. Altura promedio de Edificaciones por Manzana. Disponible en detalle en Anexo 6.
Fuente: Elaboración Propia

Adicional a los usos de cada una de las manzanas, la altura de los edificios en estas determina también el volumen de usuarios (peatones, vehículos, etc.) que se mueven desde y hacia cada

origen/destino dentro de la zona de estudio. En la *Figura 12* se han clasificado las alturas por manzana en escala de grises, del más claro al más oscuro así: de 1 a 3 pisos, de 3 a 6 pisos, de 6 a 9 pisos y más de 9 pisos, datos adicionales de entrada para la simulación a realizar.

3.4 Otras amenidades y datos de interés

Así mismo, para determinar correctamente los posibles flujos de peatones y vehículos, adicional a los usos y densidad de ocupación de las zonas, deben tenerse en cuenta las estaciones de parada del transporte público (Buses SITP y Transmilenio) así como los diferentes espacios de estacionamiento disponibles en la zona: subterráneos, bahías exteriores, públicos y privados.

Estas amenidades se encuentran detalladas en la *Figura 13*.

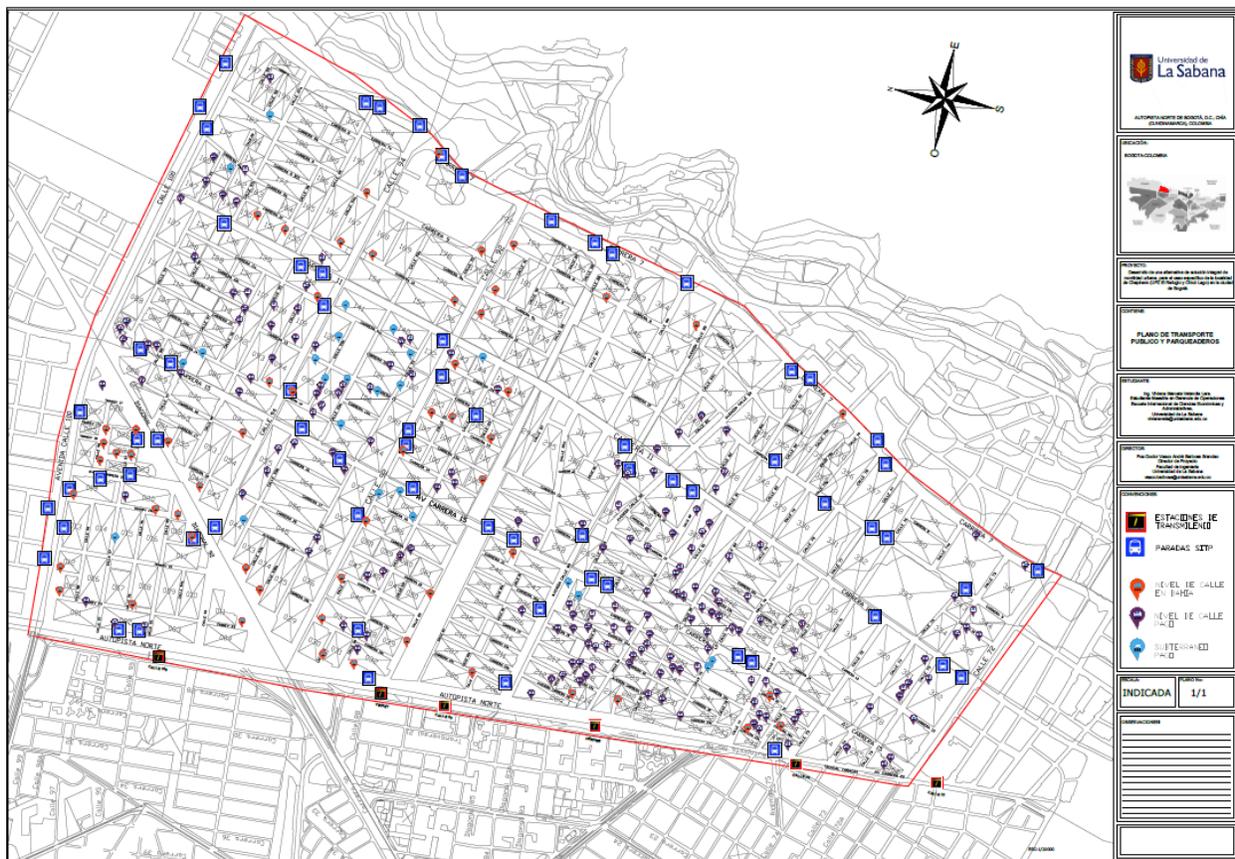


Figura 13. Parqueaderos y Estaciones de Transporte Público. Disponible en detalle en Anexo 7.
Fuente: Elaboración Propia.

3.5 Caracterización de Vías

Teniendo en cuenta que el objeto principal del presente proyecto es proponer una alternativa que mejore las condiciones de congestión y velocidad de circulación en la zona de estudio, se hace vital el entendimiento de la infraestructura vial disponible, así como la cantidad de carriles y sentido de cada una de las vías.

En la *Figura 14.*, pueden evidenciarse 3 tipos principales de vías en la zona: Vías Arteriales (En Naranja), vías intermedias (en Azul) y vías locales (en verde). Así mismo, en la *Figura 14* pueden detallarse la cantidad de carriles disponibles en cada vía y el sentido de estos. Para mayor detalle ver imagen en Anexo 8.

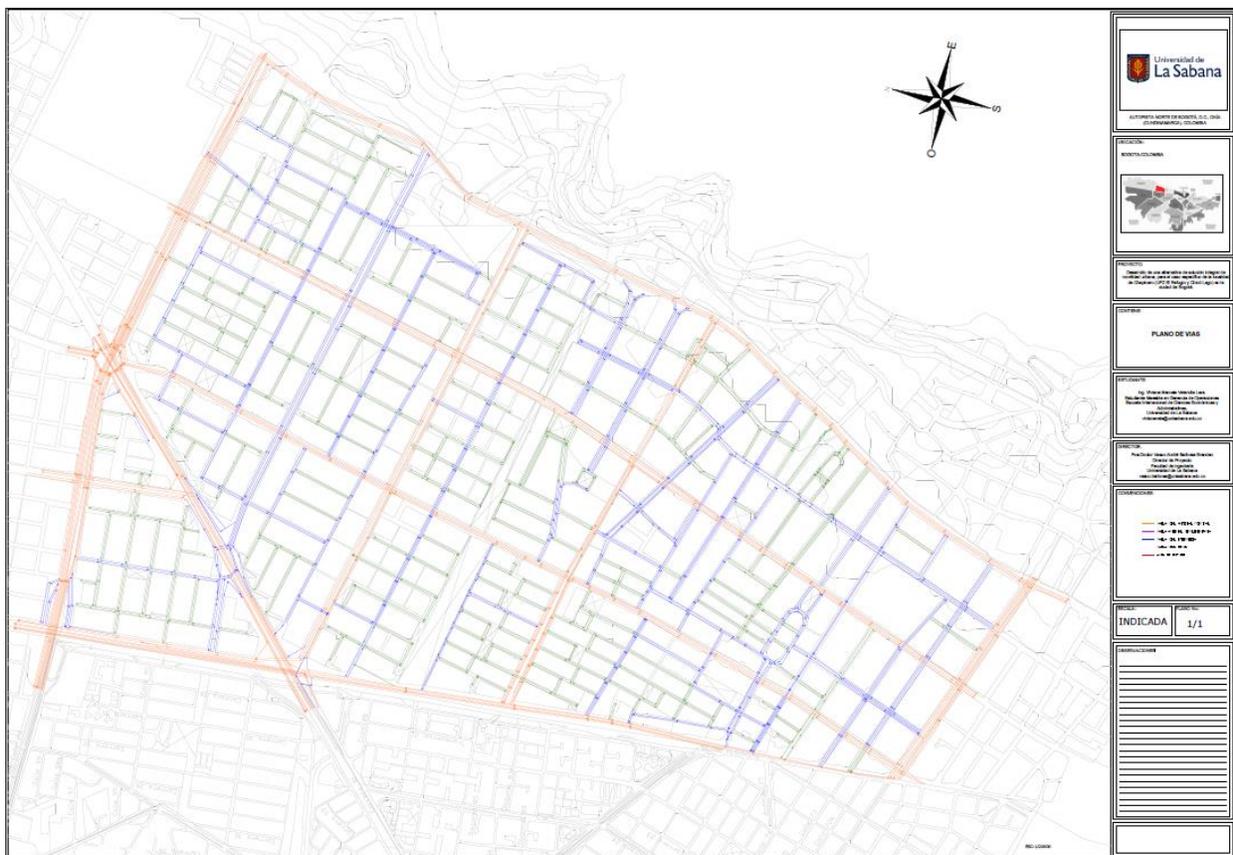


Figura 14. Caracterización de Vías. Disponible en detalle en Anexo 8.
Fuente: Elaboración Propia.

3.6 Comportamiento de Tráfico

Luego de entender la infraestructura vial disponible, es importante entender cómo se comporta el tráfico en cada una de las franjas horarias demarcadas de acuerdo con las actividades desarrolladas en la zona de estudio.

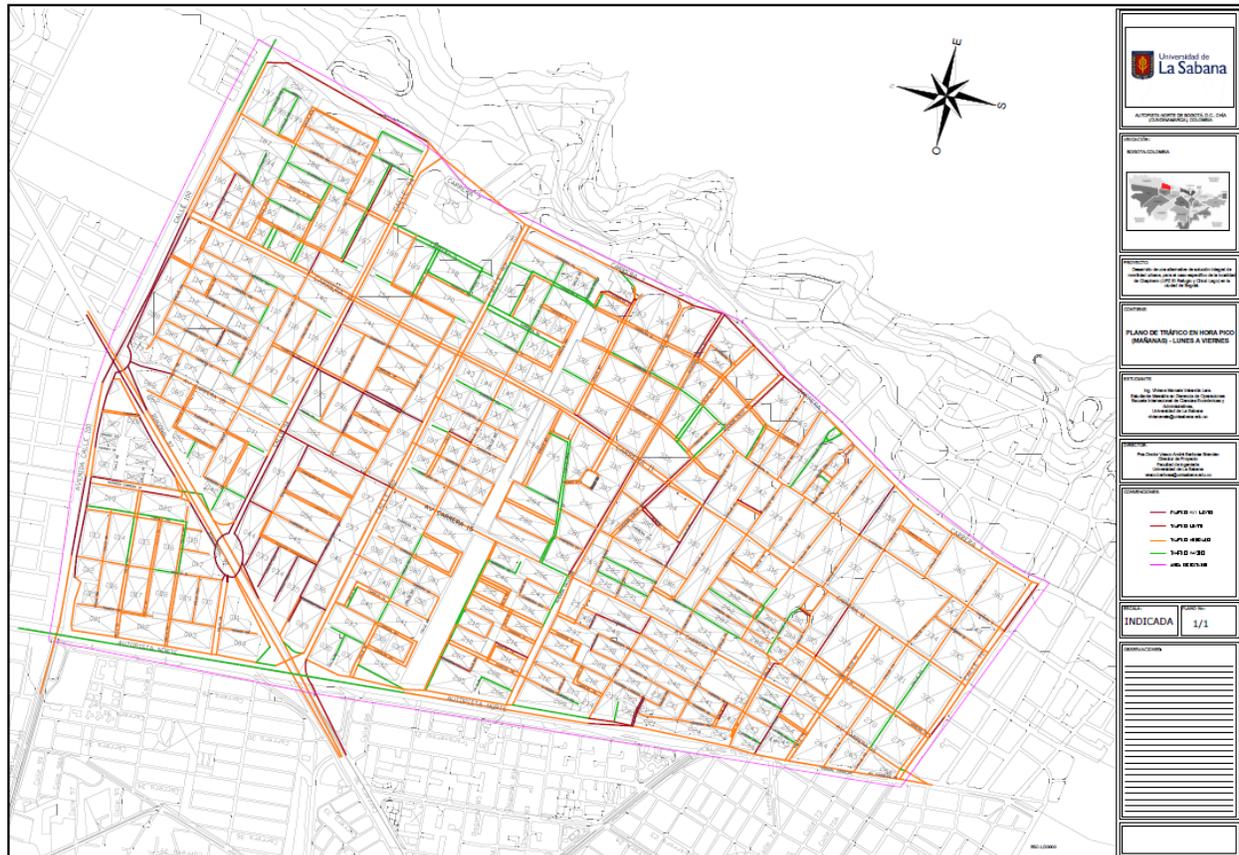


Figura 15. Comportamiento promedio de tráfico de Lunes a Viernes en hora Pico AM, de 6am a 9am. Disponible en detalle en Anexo 9. Fuente: Con base en Históricos de Google Maps, Elaboración Propia

Las siguientes Figuras, de la 15 a la 19 muestran el promedio del estado del tráfico en cada uno de los horarios señalados:

- *Figura 15:* Comportamiento promedio de tráfico de Lunes a Viernes en hora Pico AM, de 6am a 9am.
- *Figura 16:* Comportamiento promedio de tráfico de Lunes a Viernes en hora Pico PM, de 4pm a 8pm.

- *Figura 17:* Comportamiento promedio de tráfico de Lunes a Viernes en hora Valle, franja diurna fuera de horas pico.
- *Figura 18:* Comportamiento promedio de tráfico en fines de semana en horario nocturno.
- *Figura 19:* Comportamiento promedio de tráfico en fines de semana en horario diurno.

En cada uno de estos planos puede observarse el tráfico promedio en la franja detallada en escala de colores:

- Verde: Tráfico rápido.
- Naranja: Tráfico medio.
- Rojo: Tráfico lento.
- Rojo Oscuro; Tráfico muy lento.

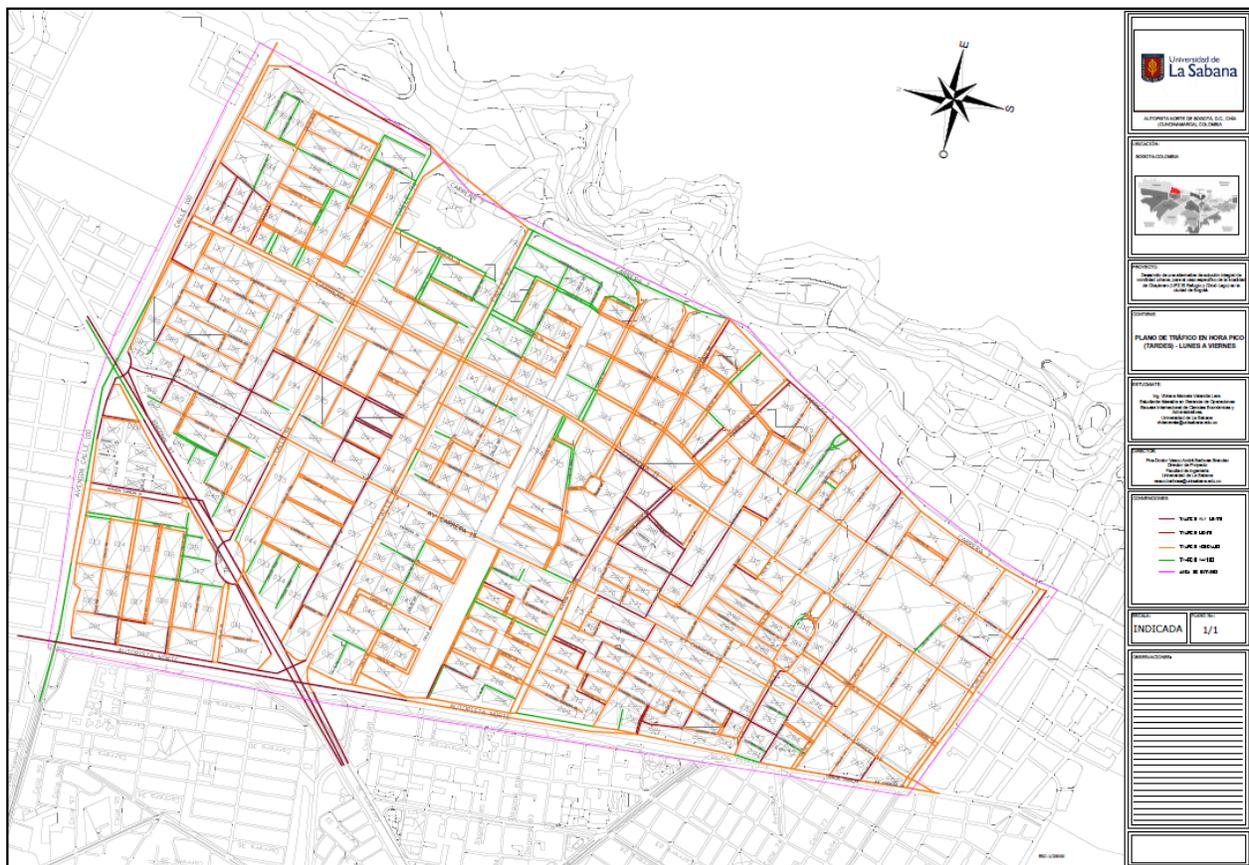


Figura 16. Comportamiento promedio de tráfico de Lunes a Viernes en hora Pico PM, de 4pm a 8pm. Disponible en detalle en Anexo 10. Fuente: Con base en Históricos de Google Maps, Elaboración Propia

Es evidente como el tráfico en las horas Pico, *Figura 15* y *Figura 16*, presenta altos niveles de congestión, en las vías arterias principales, vías intermedias e incluso en gran porcentaje de las vías locales. Se evidencian grandes congestiones en la mañana para acceder a la zona, en la tarde para salir de la misma. En la UPZ 88, la cual es principalmente zona residencial, las vías se encuentran entre tráfico rápido y medio en las dos jornadas pico del día entre semana.

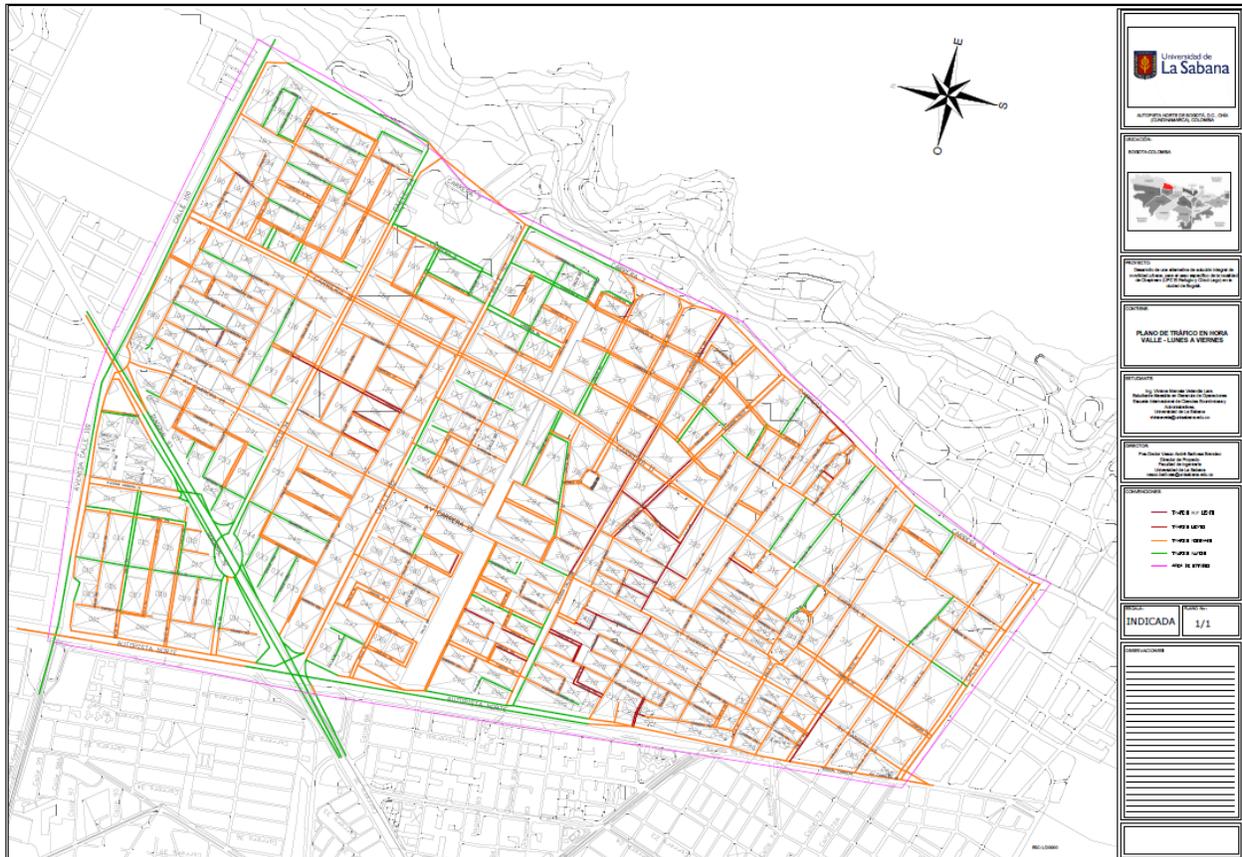


Figura 17. Comportamiento promedio de tráfico de Lunes a Viernes en hora Valle, franja diurna fuera de horas pico. Disponible en detalle en Anexo 11. Fuente: Con base en Históricos de Google Maps, Elaboración Propia

En las *Figura 18* y *Figura 19* se evidencian bajos niveles de tráfico durante el fin de semana, solamente en las zonas de vida nocturna se ven congestiones focalizadas en las noches de fin de semana.

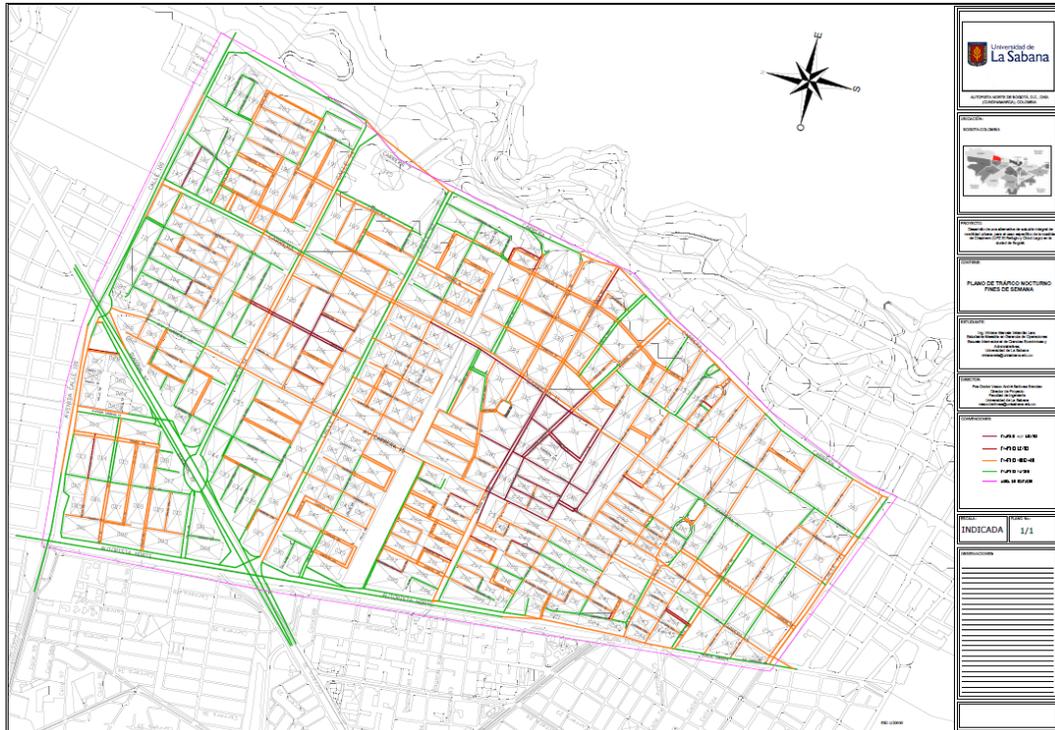


Figura 18. Comportamiento promedio de tráfico Fines de Semana Nocturno. Disponible en detalle en Anexo 12.
Fuente: Con base en Históricos de Google Maps, Elaboración Propia

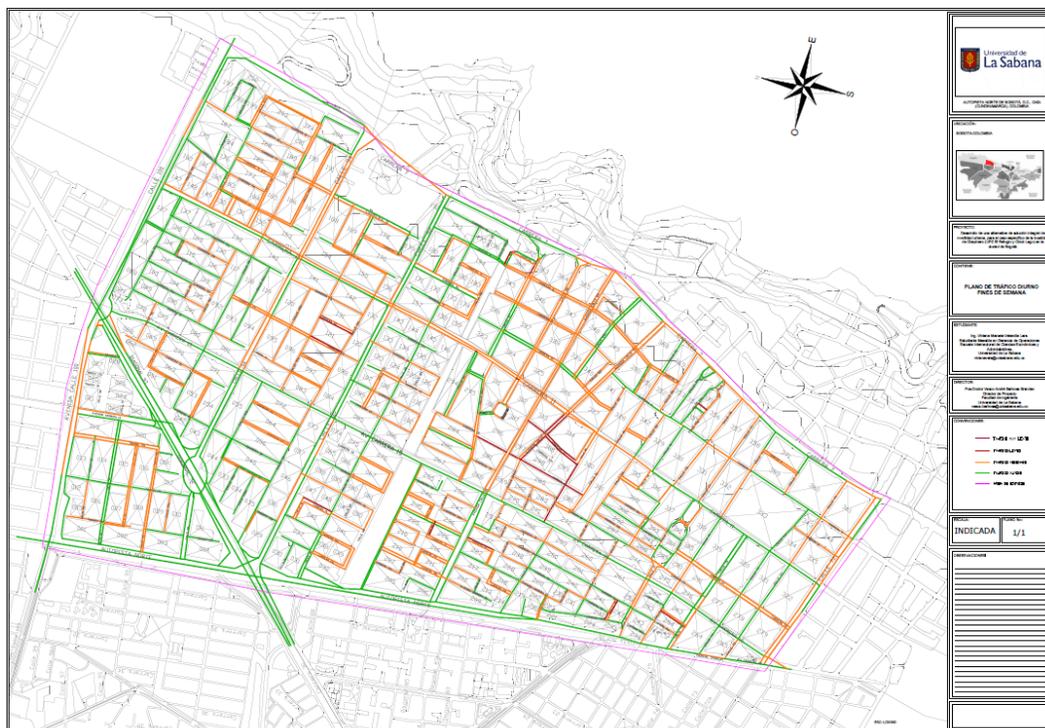


Figura 19. Comportamiento promedio de tráfico Fines de Semana Diurno. Disponible en detalle en Anexo 13.
Fuente: Con base en Históricos de Google Maps, Elaboración Propia

3.7 Cantidad de viajes y medios de transporte

De acuerdo con datos recopilados con la Encuesta de Movilidad, realizada por la Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá en el 2019 (Movilidad, 2019), Bogotá tiene 8'939.667 habitantes, de los cuales 142.071 que corresponden al 1.59% viven en la localidad de Chapinero. Estos cerca de ocho millones de habitantes, de acuerdo con la misma encuesta, realizan 13'359.728 de viajes diarios, (considerando como viaje todo desplazamiento a pie mayor a 15 minutos, en transporte público o privado, de dos o más ruedas), de los cuales el 13.15%, es decir cerca de 1'757.314 viajes, suceden en la localidad de Chapinero. Es importante resaltar, que el área de la localidad de Chapinero corresponde al 4.43% de la ciudad de Bogotá, por lo que es evidente que una alta densidad de personas y viajes y concentran en esta pequeña área urbana; lo que además arroja una tasa de 2.2 viajes diarios por persona en la localidad, el más alto de la ciudad de Bogotá (Movilidad, 2019).

De estos 13'359.728 viajes realizados diariamente en la ciudad de Bogotá, como es detallado en la *Tabla 3*, el 24.5% de los viajes son realizados a pie (superiores a 15 minutos), el 15.6% en Transmilenio, el 14.3% en automóvil privado, el 15.3% en Buses complementarios del SITP, el 7.4% de los viajes en Bicicleta y el cerca de 23% restante en moto, taxi y otros modos informales de transporte.

Tabla 3. Tipos y Cantidades de Viajes Diarios realizados en la ciudad de Bogotá.
Fuente: Elaboración propia a partir de (Movilidad, 2019)

TIPOS DE VIAJE	BOGOTA (Cantidad de Viajes)	
	%	Valor
A PIE	24.70%	3,299,853
TRANSMILENIO	15.60%	2,084,118
TAXI (Formal e Informal)	17.00%	2,271,154
SITP	15.30%	2,044,038
AUTOMOVIL	14.30%	1,910,441
BICICLETA	7.40%	988,620
MOTO	5.70%	761,504

Así mismo, se aplica a la localidad de Chapinero los mismos porcentajes de distribución de los tipos de viajes, encontrando el detalle de la *Tabla 4*, adicionalmente, segmentando de éstos cuantos tuvieron como origen y/o destino la misma localidad (Movilidad, 2019).

Tabla 4. Tipos y Cantidades de Viajes Diarios realizados en la localidad de Chapinero, separando Origen y Destino
Fuente: Elaboración propia a partir de (Movilidad, 2019)

TIPOS DE VIAJE	TOTAL CHAPINERO (Cantidad de Viajes)		ORIGEN (Cantidad de Viajes)	DESTINO (Cantidad de Viajes)
	%	Valor	Valor	Valor
	A PIE	24.70%	434,056	216,334
TRANSMILENIO	15.60%	274,141	136,632	137,509
TAXI (Formal e Informal)	17.00%	298,743	148,894	149,850
SITP	15.30%	268,869	134,004	134,865
AUTOMOVIL	14.30%	251,296	125,246	126,050
BICICLETA	7.40%	130,041	64,813	65,229
MOTO	5.70%	100,167	49,923	50,244

Finalmente, siguiendo el mismo racional, en la *Tabla 5* se realiza la extracción de los datos correspondientes a la zona de estudio, UPZ Chico Lago (97) y parte de la UPZ El Refugio (88), (Movilidad, 2019). Es importante resaltar que estos viajes de la zona de estudio incluyen los que se generan con origen y/o destino dentro de la zona y también que tienen origen/destino en otras zonas de la ciudad que empiezan/terminan en la zona de estudio.

Tabla 5. Tipos y Cantidades de Viajes Diarios realizados en la zona de estudio, separando Origen y Destino
Fuente: Elaboración propia a partir de (Movilidad, 2019)

TIPOS DE VIAJE	TOTAL ZONA DE ESTUDIO (Cantidad de Viajes)		ORIGEN (Cantidad de Viajes)	DESTINO (Cantidad de Viajes)
	%	Valor	Valor	Valor
	A PIE	24.70%	193,654	96,626
TRANSMILENIO	15.60%	122,308	61,027	61,281
TAXI (Formal e Informal)	17.00%	133,284	66,504	66,781
SITP	15.30%	119,956	59,853	60,103
AUTOMOVIL	14.30%	112,116	55,941	56,174
BICICLETA	7.40%	58,018	28,949	29,069
MOTO	5.70%	44,689	22,298	22,391

3.8 Tratamiento de Datos y Aplicación Detallada a la Zona de Estudio

Luego de la extracción de datos realizada a la encuesta de Movilidad realizada en 2019 (Movilidad, 2019), presentada en el sección 3.7, para poder profundizar y llegar tener información de la zona por días de la semana y horas del día, se realiza un tratamiento adicional a los datos combinándolos con la información oficial de la base de datos global de TomTom, quienes según su sitio web

“presentan índices de tráfico, que cubren 416 ciudades en 57 países en 6 continentes, clasifican la congestión urbana en todo el mundo y brindan acceso gratuito a información ciudad por ciudad. Usuarios académicos, junto con los conductores, los urbanistas, los fabricantes de automóviles y los responsables de la formulación de políticas, pueden utilizar los datos para ayudar a abordar los desafíos relacionados con el tráfico. En este sitio web, pueden encontrarse estadísticas de datos históricos y en tiempo real”. (TomTom International, 2021).

De la base de datos de TomTom, se extrae la información del porcentaje de capacidad de la infraestructura vial de Bogotá por día de la semana y por hora del día (Durante el 2019), como se muestra en la tabla de la *Figura 20*.

	DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIE	SAB
0:00	4%	0%	0%	0%	0%	0%	8%
1:00	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%
2:00	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
3:00	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
4:00	0%	3%	4%	3%	3%	3%	4%
5:00	0%	36%	38%	36%	36%	37%	19%
6:00	7%	65%	72%	69%	68%	67%	33%
7:00	16%	87%	98%	93%	94%	91%	48%
8:00	19%	79%	94%	88%	91%	87%	53%
9:00	25%	71%	94%	87%	91%	90%	57%
10:00	35%	62%	86%	81%	84%	88%	65%
11:00	44%	60%	81%	77%	82%	90%	76%
12:00	53%	60%	80%	78%	82%	95%	91%
13:00	57%	58%	76%	73%	78%	95%	95%
14:00	44%	58%	77%	73%	79%	102%	84%
15:00	37%	49%	62%	60%	64%	85%	71%
16:00	41%	58%	68%	66%	71%	85%	64%
17:00	49%	89%	101%	97%	103%	106%	61%
18:00	59%	100%	114%	107%	113%	113%	67%
19:00	53%	78%	89%	83%	86%	92%	62%
20:00	39%	58%	68%	64%	67%	80%	46%
21:00	25%	30%	37%	36%	40%	56%	32%
22:00	13%	16%	19%	19%	23%	38%	22%
23:00	3%	5%	4%	4%	7%	20%	12%

Figura 20. Porcentaje de Ocupación de Infraestructura Vial de Bogotá por días de la semana y horas del día.
Fuente: Elaboración Propia tomando la información de TomTom (*TomTom International, 2021*)

Ya que se evidencia que el tráfico sobrepasa la capacidad de la infraestructura vial en varios momentos de la semana (Franjas en rojo oscuro), se normalizan los datos, ver *Figura 21*, para realizar el cruce de la información tabulada de la encuesta de Movilidad 2019.

	DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIE	SAB
0:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
1:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5:00	0,000	0,004	0,005	0,004	0,004	0,004	0,002
6:00	0,001	0,008	0,009	0,008	0,008	0,008	0,004
7:00	0,002	0,010	0,012	0,011	0,011	0,011	0,006
8:00	0,002	0,009	0,011	0,011	0,011	0,010	0,006
9:00	0,003	0,008	0,011	0,010	0,011	0,011	0,007
10:00	0,004	0,007	0,010	0,010	0,010	0,011	0,008
11:00	0,005	0,007	0,010	0,009	0,010	0,011	0,009
12:00	0,006	0,007	0,010	0,009	0,010	0,011	0,011
13:00	0,007	0,007	0,009	0,009	0,009	0,011	0,011
14:00	0,005	0,007	0,009	0,009	0,009	0,012	0,010
15:00	0,004	0,006	0,007	0,007	0,008	0,010	0,008
16:00	0,005	0,007	0,008	0,008	0,008	0,010	0,008
17:00	0,006	0,011	0,012	0,012	0,012	0,013	0,007
18:00	0,007	0,012	0,014	0,013	0,014	0,014	0,008
19:00	0,006	0,009	0,011	0,010	0,010	0,011	0,007
20:00	0,005	0,007	0,008	0,008	0,008	0,010	0,006
21:00	0,003	0,004	0,004	0,004	0,005	0,007	0,004
22:00	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,005	0,003
23:00	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,002	0,001

Figura 21. Datos de tráfico TomTom normalizados

Fuente: Elaboración Propia tomando la información de TomTom (*TomTom International, 2021*)

Ya que los datos extraídos de la base de TomTom descritos en las *Figuras 20 y 21*, describen el detalle del comportamiento del tráfico por días de la semana y por horas del día es necesario convertir la información diaria de la encuesta de Movilidad de 2019, en información semanal, el resultado se puede evidenciar en la *Tabla 6*.

Tabla 6. Tipos y Cantidades de Viajes Semanales realizados en la zona de estudio, separando Origen y Destino.

Fuente: Elaboración propia a partir de (*Movilidad, 2019*)

TIPOS DE VIAJE	TOTAL SEMANAL ZONA DE ESTUDIO (Cantidad de Viajes)		ORIGEN (Cantidad de Viajes)	DESTINO (Cantidad de Viajes)
	%	Valor	Valor	Valor
A PIE	24,70%	1.355.580	676.382	679.198
TRANSMILENIO	15,60%	856.156	427.189	428.967
Cada Estacion	3,12%	171.231	85.438	85.793
TAXI (Formal e Info	17,00%	932.990	465.526	467.464
SITP	15,30%	839.691	418.974	420.718
AUTOMOVIL	14,30%	784.809	391.590	393.220
BICICLETA	7,40%	406.125	202.641	203.484
MOTO	5,70%	312.826	156.088	156.738

Por otro lado, se combinan los porcentajes de los tipos de viaje descritos en la *Tabla 6*, con la base de datos general de Zonas de Origen y Zonas de Destino de la encuesta de Movilidad. Esto con el

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS DE USOS DE LA MALLA VIAL BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL Y SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES, CHAPINERO, BOGOTÁ.

fin de calcular la cantidad exacta de viajes por zona por tipo de viaje, tanto de Orígenes (Ver *Tabla7*) como de Destinos (Ver *Tabla8*).

Tabla 7. Tipos y Cantidades de Viajes Semanales con Origen en la zona de estudio, separando la Zona o ZAT específica. Fuente: Elaboración propia a partir de (*Movilidad, 2019*) y (*TomTom International, 2021*)

ZAT	ESTACIONES TRANSMILENIO	A PIE	TRANSMILENIO	TAXI (Formal e Informal)	SITP	AUTOMOVIL	BICICLETA	MOTO	ORIGEN (Cantidad de Viajes)
Z1	163 CALLE 85	48.332	85.438	33.265	29.939	27.982	14.480	11.154	195.677
Z2	164 VIRREY	26.779	85.438	18.431	16.588	15.503	8.023	6.180	108.415
Z3	165	23.287		16.028	14.425	13.482	6.977	5.374	94.281
Z4	166	11.682		8.040	7.236	6.763	3.500	2.696	47.294
Z5	241 HEROES	45.078	85.438	31.025	27.923	26.098	13.505	10.403	182.503
Z6	242	37.209		25.609	23.048	21.542	11.148	8.587	150.643
Z7	243	7.463		5.136	4.623	4.321	2.236	1.722	30.215
Z8	245	29.826		20.528	18.475	17.268	8.936	6.883	120.755
Z9	246	38.237		26.317	23.685	22.137	11.456	8.824	154.805
Z10	247 CALLE 72 Y CALLE 70	61.899	85.438	42.603	38.343	35.836	18.545	14.284	250.605
Z11	256	13.250		9.120	8.208	7.671	3.970	3.058	53.645
Z12	257	17.304		11.909	10.718	10.018	5.184	3.993	70.055
Z13	258	79.601		54.786	49.308	46.085	23.848	18.370	322.272
Z14	259	67.965		46.777	42.100	39.348	20.362	15.684	275.161
Z15	260	4.640		3.193	2.874	2.686	1.390	1.071	18.785
Z16	261	38.770		26.684	24.015	22.446	11.615	8.947	156.964
Z17	262	10.595		7.292	6.563	6.134	3.174	2.445	42.895
Z18	263	5.870		4.040	3.636	3.398	1.758	1.355	23.763
Z19	847	48.984		33.714	30.342	28.359	14.675	11.304	198.316
Z20	849 CALLE 100	59.611	85.438	41.028	36.925	34.512	17.859	13.756	241.341
TOTALES		676.382	427.189	465.526	418.974	391.590	202.641	156.088	2.738.389

Tabla 8. Tipos y Cantidades de Viajes Semanales con Origen en la zona de estudio, separando la Zona o ZAT específica. Fuente: Elaboración propia a partir de (*Movilidad, 2019*) y (*TomTom International, 2021*)

ZAT	ESTACIONES TRANSMILENIO	A PIE	TRANSMILENIO	TAXI (Formal e Informal)	SITP	AUTOMOVIL	BICICLETA	MOTO	DESTINO (Cantidad de Viajes)
Z1	163 CALLE 85	46.635	85.793	32.097	28.887	26.999	13.972	10.762	188.804
Z2	164 VIRREY	27.723	85.793	19.081	17.173	16.050	8.306	6.398	112.241
Z3	165	22.188		15.271	13.744	12.846	6.647	5.120	89.830
Z4	166	11.597		7.982	7.184	6.714	3.474	2.676	46.952
Z5	241 HEROES	45.763	85.793	31.497	28.347	26.494	13.710	10.561	185.276
Z6	242	37.139		25.561	23.005	21.502	11.127	8.571	150.361
Z7	243	7.836		5.393	4.854	4.537	2.348	1.808	31.726
Z8	245	31.310		21.549	19.394	18.127	9.380	7.225	126.760
Z9	246	39.236		27.004	24.304	22.715	11.755	9.054	158.849
Z10	247 CALLE 72 Y CALLE 70	62.508	85.793	43.022	38.719	36.189	18.727	14.425	253.068
Z11	256	12.818		8.822	7.940	7.421	3.840	2.958	51.894
Z12	257	15.479		10.653	9.588	8.961	4.637	3.572	62.667
Z13	258	80.695		55.539	49.985	46.718	24.176	18.622	326.702
Z14	259	69.407		47.770	42.993	40.183	20.794	16.017	281.002
Z15	260	4.903		3.374	3.037	2.838	1.469	1.131	19.849
Z16	261	38.394		26.425	23.783	22.228	11.503	8.860	155.443
Z17	262	9.804		6.748	6.073	5.676	2.937	2.263	39.694
Z18	263	7.216		4.967	4.470	4.178	2.162	1.665	29.216
Z19	847	46.123		31.745	28.570	26.703	13.818	10.644	186.733
Z20	849 CALLE 100	62.422	85.793	42.963	38.666	36.139	18.701	14.405	252.721
TOTALES		679.198	428.967	467.464	420.718	393.220	203.484	156.738	2.749.789

Es importante anotar, de las dos tablas anteriores, que teniendo en cuenta que 5 estaciones de Transmilenio rodean la zona, específicamente sobre una de las avenidas del perímetro (Autopista Norte), se determina el supuesto de que cada estación tiene la misma cantidad de viajes origen/destino: cada estación 122.308 viajes dividido en 5 y más adelante se verá que estos viajes alimentan la zona con usuarios Peatones adicionales a los calculados.

Para futuras referencias, en las *Tablas 6, 7 y 8* se marcan en rosa las filas que se tendrán en cuenta en la simulación como datos de viajes de peatones en la zona. Así mismo, en la *Tabla 6* se resaltan en verde los tipos de viaje, que representan cerca del 86% de los viajes de la zona, los cuales serán tenidos en cuenta en los análisis posteriores de la simulación.

Finalmente, con los datos extraídos en las *Tablas 6, 7 y 8* se realiza el cruce con cada una de las filas y columnas de la Figura 21, obteniendo una tabla separada por cada día de la semana, por cada uno de los Tipos de Viaje seleccionados en el 86% de los viajes totales: A Pie (Incluyendo usuarios que llegan en Transmilenio), en Bus (o SITP), en Taxis (formales e informales) y en vehículo particular (Carro o Automóvil), discriminado por días, horas y zonas. Como pueden observarse en los ejemplos de las *Figuras 22, 23, 24 y 25*.

HORA	VIERNES (VIAJES CON ORIGEN EN LA ZONA DE ESTUDIO - TIPO DE VIAJE: PEATONES)																				TOTAL	$\lambda_{z_{i,j}}$	Poisson
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17	Z18	Z19	Z20			
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,0000	0,000000
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,0000	0,000000
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,0000	0,000000
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,0000	0,000000
4:00	48	40	8	4	47	15	3	11	14	53	5	6	29	24	2	14	4	2	18	52	396	0,0066	0,006582
5:00	592	497	103	52	578	165	33	132	169	652	59	77	353	301	21	172	47	26	217	642	4.887	0,0815	0,078223
6:00	1.073	900	187	94	1.047	298	60	239	307	1.182	106	139	638	545	37	311	85	47	393	1.163	8.850	0,1475	0,137133
7:00	1.457	1.222	254	127	1.422	405	81	325	416	1.605	144	188	867	740	51	422	115	64	534	1.580	12.020	0,2003	0,181539
8:00	1.393	1.168	242	122	1.359	387	78	311	398	1.534	138	180	829	708	48	404	110	61	510	1.510	11.491	0,1915	0,174300
9:00	1.441	1.209	251	126	1.406	401	80	321	412	1.587	143	186	857	732	50	418	114	63	528	1.562	11.888	0,1981	0,179735
10:00	1.409	1.182	245	123	1.375	392	79	314	403	1.552	140	182	838	716	49	408	112	62	516	1.528	11.623	0,1937	0,176115
11:00	1.441	1.209	251	126	1.406	401	80	321	412	1.587	143	186	857	732	50	418	114	63	528	1.562	11.888	0,1981	0,179735
12:00	1.521	1.276	265	133	1.484	423	85	339	435	1.675	151	197	905	773	53	441	120	67	557	1.649	12.548	0,2091	0,188714
13:00	1.521	1.276	265	133	1.484	423	85	339	435	1.675	151	197	905	773	53	441	120	67	557	1.649	12.548	0,2091	0,188714
14:00	1.633	1.370	284	143	1.593	454	91	364	467	1.799	162	211	972	830	57	473	129	72	598	1.771	13.473	0,2245	0,201120
15:00	1.361	1.142	237	119	1.328	379	76	303	389	1.499	135	176	810	691	47	394	108	60	498	1.476	11.227	0,1871	0,170656
16:00	1.361	1.142	237	119	1.328	379	76	303	389	1.499	135	176	810	691	47	394	108	60	498	1.476	11.227	0,1871	0,170656
17:00	1.697	1.424	295	148	1.656	472	95	378	485	1.869	168	220	1.010	862	59	492	134	74	621	1.840	14.001	0,2334	0,208124
18:00	1.809	1.518	315	158	1.765	503	101	403	517	1.993	179	234	1.077	919	63	524	143	79	663	1.962	14.926	0,2488	0,220233
19:00	1.473	1.236	256	129	1.437	410	82	328	421	1.622	146	191	877	748	51	427	117	65	539	1.597	12.152	0,2025	0,183338
20:00	1.281	1.074	223	112	1.250	356	71	286	366	1.411	127	166	762	651	44	371	101	56	469	1.389	10.567	0,1761	0,161477
21:00	897	752	156	78	875	249	50	200	256	988	89	116	534	456	31	260	71	39	328	972	7.397	0,1233	0,115983
22:00	608	510	106	53	594	169	34	136	174	670	60	79	362	309	21	176	48	27	223	660	5.019	0,0837	0,080250
23:00	320	269	56	28	312	89	18	71	92	353	32	41	191	163	11	93	25	14	117	347	2.642	0,0440	0,043073

Figura 22. Ejemplo de tabla de viajes peatonales con origen en la zona de estudio, discriminado por ZAT y hora del viernes. Fuente: Elaboración Propia tomando la información de (*Movilidad, 2019*) y TomTom (*TomTom International, 2021*)

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS DE USOS DE LA MALLA VIAL BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL Y SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES, CHAPINERO, BOGOTÁ.

HORA	VIERNES (VIAJES CON ORIGEN EN LA ZONA DE ESTUDIO - TIPO DE VIAJE: TAXI)																				TOTAL	λ_{taxi}	Poisson
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17	Z18	Z19	Z20			
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,0000	0,000000
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,0000	0,000000
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,0000	0,000000
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,0000	0,000000
4:00	12	7	6	3	11	9	2	7	9	15	3	4	20	17	1	10	3	1	12	15	167	0,0056	0,005556
5:00	147	82	71	36	137	113	23	91	117	189	40	53	243	207	14	118	32	18	149	182	2.062	0,0687	0,066411
6:00	267	148	129	64	249	205	41	165	211	342	73	96	439	375	26	214	58	32	270	329	3.733	0,1244	0,117007
7:00	362	201	175	88	338	279	56	224	287	464	99	130	597	509	35	291	79	44	367	447	5.070	0,1690	0,155501
8:00	346	192	167	84	323	267	53	214	274	444	95	124	570	487	33	278	76	42	351	427	4.847	0,1616	0,149204
9:00	358	199	173	87	334	276	55	221	283	459	98	128	590	504	34	287	79	44	363	442	5.015	0,1672	0,153931
10:00	350	194	169	85	327	270	54	216	277	449	96	125	577	493	34	281	77	43	355	432	4.903	0,1634	0,150783
11:00	358	199	173	87	334	276	55	221	283	459	98	128	590	504	34	287	79	44	363	442	5.015	0,1672	0,153931
12:00	378	210	182	91	353	291	58	233	299	484	104	135	623	532	36	303	83	46	383	467	5.293	0,1764	0,161752
13:00	378	210	182	91	353	291	58	233	299	484	104	135	623	532	36	303	83	46	383	467	5.293	0,1764	0,161752
14:00	406	225	196	98	379	313	63	251	321	520	111	145	669	571	39	326	89	49	412	501	5.683	0,1894	0,172579
15:00	538	188	163	82	316	261	52	209	268	433	93	121	557	476	32	271	74	41	343	417	4.736	0,1579	0,146038
16:00	338	188	163	82	316	261	52	209	268	433	93	121	557	476	32	271	74	41	343	417	4.736	0,1579	0,146038
17:00	422	234	203	102	394	325	65	260	334	541	116	151	695	593	41	339	93	51	428	521	5.906	0,1969	0,178704
18:00	450	249	217	109	420	346	69	278	356	576	123	161	741	633	43	361	99	55	456	555	6.296	0,2099	0,189312
19:00	366	203	176	89	342	282	57	226	290	469	100	131	603	515	35	294	80	44	371	452	5.126	0,1709	0,157068
20:00	319	176	153	77	297	245	49	197	252	408	87	114	525	448	31	256	70	39	323	393	4.487	0,1486	0,138071
21:00	223	124	107	54	208	172	34	138	176	286	61	80	367	314	21	179	49	27	226	275	3.120	0,1040	0,098781
22:00	151	84	73	37	141	116	23	93	120	194	41	54	249	213	15	121	33	18	153	187	2.117	0,0706	0,068144
23:00	80	44	38	19	74	61	12	49	63	102	22	29	131	112	8	64	17	10	81	98	1.114	0,0371	0,036464

Figura 23. Ejemplo de tabla de viajes en TAXI con origen en la zona de estudio, discriminado por ZAT y hora del viernes. Fuente: Elaboración Propia tomando la información de (Movilidad, 2019) y TomTom (TomTom International, 2021)

HORA	VIERNES (VIAJES CON ORIGEN EN LA ZONA DE ESTUDIO - TIPO DE VIAJE: SITP)																				TOTAL	λ_{sitp}	Poisson
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17	Z18	Z19	Z20			
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,0000	0,000000
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,0000	0,000000
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,0000	0,000000
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,0000	0,000000
4:00	11	6	5	3	10	8	2	7	9	14	3	4	18	15	1	9	2	1	11	13	150	0,0050	0,005002
5:00	133	73	64	32	124	102	20	82	105	170	36	47	218	186	13	106	29	16	134	164	1.855	0,0618	0,059974
6:00	240	133	116	58	224	185	37	148	190	307	66	86	395	338	23	193	53	29	243	296	3.360	0,1120	0,105950
7:00	326	181	157	79	304	251	50	201	258	418	89	117	537	459	31	262	71	40	330	402	4.563	0,1521	0,141107
8:00	312	173	150	75	291	240	48	192	247	399	85	112	513	438	30	250	68	38	316	384	4.363	0,1454	0,135345
9:00	322	179	155	78	301	248	50	199	255	413	88	115	531	453	31	259	71	39	327	398	4.513	0,1504	0,139670
10:00	315	175	152	76	294	243	49	195	249	404	86	113	519	443	30	253	69	38	320	389	4.413	0,1471	0,136789
11:00	322	179	155	78	301	248	50	199	255	413	88	115	531	453	31	259	71	39	327	398	4.513	0,1504	0,139670
12:00	340	189	164	82	317	262	53	210	269	436	93	122	561	479	33	273	75	41	345	420	4.764	0,1588	0,146831
13:00	340	189	164	82	317	262	53	210	269	436	93	122	561	479	33	273	75	41	345	420	4.764	0,1588	0,146831
14:00	365	203	176	88	341	281	56	226	289	468	100	131	602	514	35	293	80	44	370	451	5.115	0,1705	0,156755
15:00	305	169	147	74	284	234	47	188	241	390	84	109	502	428	29	244	67	37	309	376	4.262	0,1421	0,132450
16:00	305	169	147	74	284	234	47	188	241	390	84	109	502	428	29	244	67	37	309	376	4.262	0,1421	0,132450
17:00	380	210	183	92	354	292	59	234	300	486	104	136	626	534	36	305	83	46	385	468	5.316	0,1772	0,162374
18:00	405	224	195	98	378	312	63	250	320	519	111	145	667	569	39	325	89	49	410	499	5.667	0,1889	0,172118
19:00	330	183	159	80	307	254	51	203	261	422	90	118	543	464	32	264	72	40	334	407	4.613	0,1538	0,142541
20:00	287	159	138	69	267	221	44	177	227	367	79	103	472	403	28	230	63	35	291	354	4.012	0,1337	0,125168
21:00	201	111	97	48	187	154	31	124	159	257	55	72	330	282	19	161	44	24	205	247	2.808	0,0936	0,089359
22:00	136	75	66	33	127	105	21	84	108	174	37	49	224	191	13	109	30	17	138	168	1.906	0,0635	0,061544
23:00	72	40	35	17	67	55	11	44	57	92	20	26	118	101	7	57	16	9	73	88	1.003	0,0334	0,032878

Figura 24. Ejemplo de tabla de viajes en SITP con origen en la zona de estudio, discriminado por ZAT y hora del viernes. Fuente: Elaboración Propia tomando la información de (Movilidad, 2019) y TomTom (TomTom International, 2021)

HORA	VIERNES (VIAJES CON ORIGEN EN LA ZONA DE ESTUDIO - TIPO DE VIAJE: AUTOMÓVIL)																				TOTAL	λ_{tick}	Poisson
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17	Z18	Z19	Z20			
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,0000	0,000000
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,0000	0,000000
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,0000	0,000000
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,0000	0,000000
4:00	10	6	5	2	9	8	2	6	8	13	3	4	17	14	1	8	2	1	10	12	141	0,0047	0,004676
5:00	124	69	60	30	116	95	19	76	98	159	34	44	204	174	12	99	27	15	126	153	1.734	0,0578	0,056166
6:00	224	124	108	54	209	173	35	138	178	287	62	80	370	316	22	180	49	27	227	277	3.140	0,1047	0,099382
7:00	305	169	147	74	284	235	47	188	241	390	84	109	502	429	29	244	67	37	309	376	4.265	0,1422	0,132525
8:00	291	161	140	70	272	224	45	180	231	373	80	104	480	410	28	234	64	35	295	359	4.078	0,1359	0,127087
9:00	301	167	145	73	281	232	47	186	238	386	83	108	496	424	29	242	66	37	305	372	4.218	0,1406	0,131169
10:00	295	163	142	71	275	227	46	182	233	377	81	106	485	414	28	236	65	36	299	363	4.124	0,1375	0,128450
11:00	301	167	145	73	281	232	47	186	238	386	83	108	496	424	29	242	66	37	305	372	4.218	0,1406	0,131169
12:00	318	176	153	77	297	245	49	196	252	407	87	114	524	447	31	255	70	39	322	392	4.453	0,1484	0,137929
13:00	318	176	153	77	297	245	49	196	252	407	87	114	524	447	31	255	70	39	322	392	4.453	0,1484	0,137929
14:00	342	189	165	83	319	263	53	211	270	438	94	122	563	480	33	274	75	41	346	421	4.781	0,1594	0,147306
15:00	285	158	137	69	266	219	44	176	225	365	78	102	469	400	27	228	62	35	289	351	3.984	0,1328	0,124356
16:00	285	158	137	69	266	219	44	176	225	365	78	102	469	400	27	228	62	35	289	351	3.984	0,1328	0,124356
17:00	355	197	171	86	331	273	55	219	281	455	97	127	585	499	34	285	78	43	360	438	4.968	0,1656	0,152618
18:00	378	210	182	91	353	291	58	234	299	485	104	135	623	532	36	304	83	46	384	467	5.296	0,1765	0,161834
19:00	308	171	148	74	287	237	48	190	244	395	84	110	507	433	30	247	68	37	312	380	4.312	0,1437	0,133880
20:00	268	148	129	65	250	206	41	165	212	343	73	96	441	377	26	215	59	33	272	330	3.750	0,1250	0,117489
21:00	188	104	90	45	175	144	29	116	148	240	51	67	309	264	18	150	41	23	190	231	2.625	0,0875	0,083771
22:00	127	71	61	31	119	98	20	79	101	163	35	46	210	179	12	102	28	15	129	157	1.781	0,0594	0,057639
23:00	67	37	32	16	62	52	10	41	53	86	18	24	110	94	6	54	15	8	68	83	937	0,0312	0,030763

Figura 25. Ejemplo de tabla de viajes en Automóvil con origen en la zona de estudio, discriminado por ZAT y hora del viernes. Fuente: Elaboración Propia tomando la información de (Movilidad, 2019) y TomTom (TomTom International, 2021)

Cada una de las tablas discriminadas por Tipo de Viaje, día de la Semana, orígenes y destinos puede encontrarse en detalle en el Anexo 14. Tratamiento de Datos para Simulación. En cada una de estas informaciones, como se aprecia también en los ejemplos de las Figuras 22 a 25, en las últimas 2 columnas se muestran los cálculos realizados para traducir la unidad de tiempo real a la unidad de tiempo en la simulación λ_{tick} , y el cálculo de la función de Poisson que, en el Capítulo 5, describirá la probabilidad que determinará el instante exacto de la simulación en la que debe generarse cada tipo de viajero.

En el Anexo 14 pueden encontrarse también, en cada una de las horas, tipos de viaje y días de la semana, las probabilidades calculadas para la creación de los viajeros en cada una de las subzonas o ZATs del área de estudio, como se muestra en la Tabla 9. El uso de estas probabilidades también será descrito en el Capítulo 5.

Tabla 9. Cálculos de Probabilidades para la generación de Tipos de Viaje de Acuerdo con la Subzona o ZAT determinada. Fuente: Elaboración Propia tomando la información de (*Movilidad, 2019*)

HORA	SUBZONA O ZAT (ZONA DE ASIGNACIÓN TERRITORIAL)																				TOTAL
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17	Z18	Z19	Z20	
% viajes por zona	0,0715	0,0396	0,0344	0,0173	0,0666	0,0550	0,0110	0,0441	0,0565	0,0915	0,0196	0,0256	0,1177	0,1005	0,0069	0,0573	0,0157	0,0087	0,0724	0,0681	1
% acum por zona	0,0715	0,1110	0,1455	0,1627	0,2294	0,2844	0,2954	0,3395	0,3961	0,4876	0,5072	0,5328	0,6504	0,7509	0,7578	0,8151	0,8308	0,8394	0,9119	1,0000	1

3.9 Diagrama de ciclos causales

Como puede inferirse de la literatura revisada y además al detallar parte de las variables que involucran el problema del tráfico urbano, se hace evidente que nos encontramos frente a un sistema dinámico de gran complejidad y en esta medida, buscando una de las formas útiles de representar y comprender este tipo de sistemas, se utiliza la herramienta de diagrama de ciclos causales.

De acuerdo con Jaén (2006) “Los diagramas causales son una herramienta útil en dinámica de sistemas. Ellos ilustran la estructura de realimentación del sistema. Al ser una concepción conceptual, también sirven para identificar los mapas mentales de las personas u organizaciones. Los diagramas causales son fundamentales para la dinámica de sistemas, pues además de lo anterior, sirven de guías para la elaboración y comprensión de los modelos. Al diagrama causal también se le suele llamar hipótesis dinámica.”

Según Franco, Méndez y Espitia (2015), “El diagrama causal es aquel que muestra la relación entre cada par de variables y da su sentido de relación. Para obtener un diagrama causal se realiza para cada par de variables una flecha en la cual se utiliza un signo para indicar si la relación es positiva o negativa, en la *Figura 26* se muestra la relación de las variables 1(V1.) y 2(V2.), y el signo positivo de la relación, lo que indica que a cualquier aumento de la variable 1, existe un crecimiento de la variable 2 (no tiene que ser en la misma proporción), y ocurre lo mismo en el caso de que la variable 1 decrezca. Una relación negativa indica que a un aumento de la variable 1 generará un decrecimiento de la variable 2”



Figura 26. Ejemplo de Diagrama Causal.
Fuente: (*Franco, Méndez, & Espitia, 2015*)

Los ciclos de realimentación nos sirven para ver la información del estado del sistema en un momento específico, cuando este sistema ha sido sometido a un condición puntual o alteración. Los ciclos pueden ser positivos o negativos, un ciclo positivo indica que todas las conexiones entre variables son positivas, es decir que siempre hay un refuerzo positivo en el comportamiento; por otro lado, un bucle negativo muestra las situaciones en las cuales se quiere alcanzar una meta o lograr un objetivo (Franco, Méndez, & Espitia, 2015).

Tabla 10. Causas de la problemática del tráfico en Bogota.
Fuente: (Franco, Méndez, & Espitia, 2015)

Causa de la problemática	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia acumulada	Porcentaje Acumulado
Gestión deficiente en la planeación de la movilidad	51	14,6 %	51	14,6 %
Uso indiscriminado del automóvil	38	10,9 %	89	25,4 %
Modelo empresarial en el sector transporte	36	10,3 %	125	35,7 %
Infraestructura vial	33	9,4 %	158	45,1 %
Incremento del parque automotor	27	7,7 %	185	52,9 %
Ordenamiento territorial	27	7,7 %	212	60,6 %
Calidad del transporte público y masivo	25	7,1 %	237	67,7 %
Debilidades institucionales	23	6,6 %	260	74,3 %
Sobreoferta de transporte	22	6,3 %	282	80,6 %
Desintegración de sistemas de transporte público	18	5,1 %	300	85,7 %
Congestión vial	16	4,6 %	316	90,3 %
Tasa de accidentalidad	12	3,4 %	328	93,7 %
Cultura ciudadana	11	3,1 %	339	96,9 %
Ilegalidad	11	3,1 %	350	100 %

Franco et al. (2015) realizaron un análisis de Pareto en donde mediante la información consultada a más de 50 expertos en el tema llegaron a la conclusión de las principales variables que componen la problemática del tráfico en Bogotá, las cuales se describen en la *Tabla 10*.

Así mismo, con estas causas asociadas a la problemática del tráfico y congestión en Bogotá Franco et al. (2015), proponen un diagrama de ciclos causales generales mostrado en la *Figura 27*

En el *Anexo 15*, puede verse la versión extendida y completa del diagrama de ciclos causales planteado por Franco, Méndez y Espitia (2015).

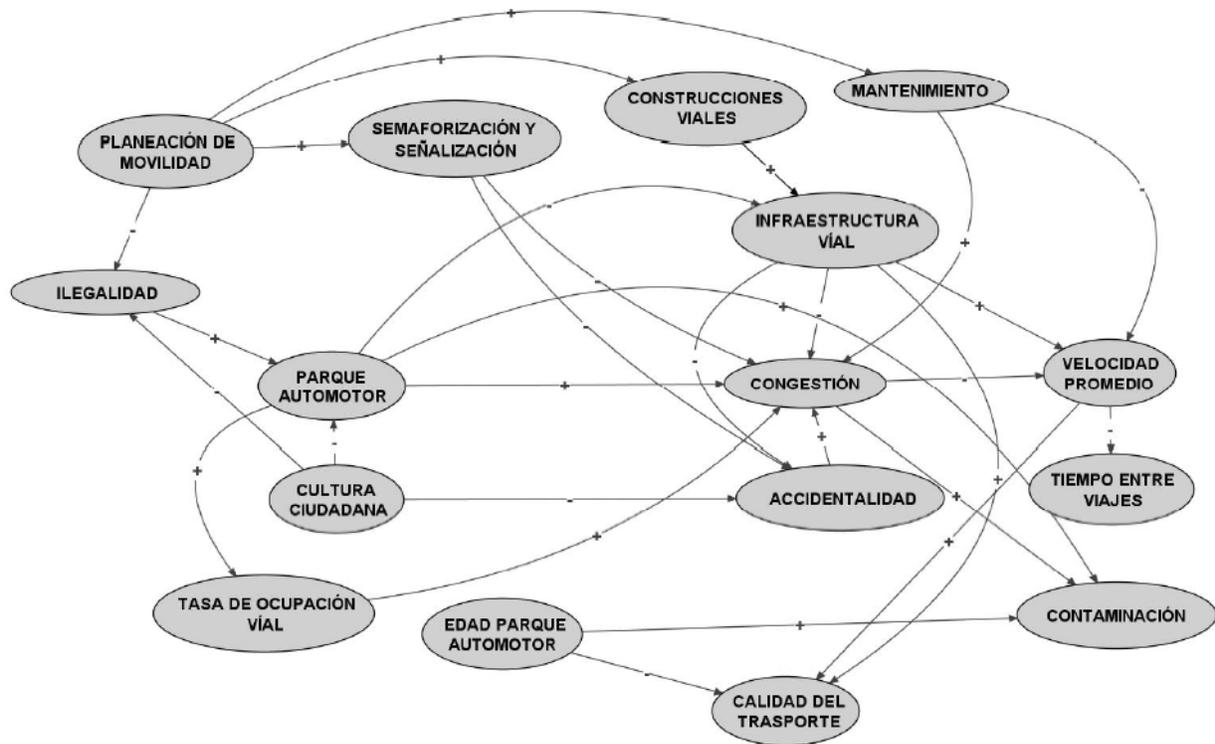


Figura 27. Diagrama General de Ciclos Causales.
Fuente: (Franco, Méndez, & Espitia, 2015)

De estos diagramas evaluados pueden concluirse entre muchas otras, las siguientes relaciones:

- A mayor planeación de movilidad, se generarían más estrategias de mantenimiento de las vías. Lo que podría incrementar la velocidad promedio de circulación y así se contribuiría a la disminución de la congestión y el tráfico, mejorando el tiempo promedio entre viajes.
- De igual forma, de manera casi obvia, a mayor planeación de movilidad se podrían generar más proyectos de construcciones viales que a su vez, incrementarían la infraestructura vial para llegar a disminuir hasta cierto punto la congestión y tráfico vehicular, mejorando el tiempo promedio entre viajes.
- La planeación de la movilidad influye también en aspectos como la ilegalidad, semaforización, planes para mejora de la cultura ciudadana, lo que al final tendría efectos en la reducción del parque automotor, la accidentalidad y la congestión vial. Lo que al final se traduce en menores tiempos de desplazamiento y calidad de vida.

- El diagrama extendido muestra relaciones adicionales que involucran actores como las motocicletas, servicios informales de transporte de personas, los cuales al final desembocan en incrementos del parque automotor, deterioro de la infraestructura vial, mayor congestión y tiempos de desplazamiento mayores.
- No se encuentran específicamente descritos en la documentación de referencia. Sin embargo, se podría agregar una relación adicional de la planeación de movilidad con campañas de educación ciudadana, retomando el uso de transportes alternativos, motivación al transporte peatonal, mejoras a la infraestructura del transporte público, para evitar el crecimiento del parque automotor y así dar un mayor y más eficiente uso de los recursos e infraestructura actual. Nuevamente, disminuyendo las congestiones viales, mejorando la velocidad de circulación de las vías e incluso la percepción de seguridad y calidad de vida de los actores del espacio vial.

Finalmente, de acuerdo con toda la información descrita en detalle en este capítulo a continuación se realiza el siguiente diagnóstico:

- La zona de estudio tiene una combinación de usos de espacio entre solamente comercial (alrededor del 30%), solamente residencial (alrededor del 42%), mixto (comercial + residencial) (alrededor del 25%), equipamientos (alrededor del 6%) y vida nocturna (alrededor del 2%). Lo que la hace una zona altamente activa en la mayor parte del tiempo.
- De acuerdo con la altura promedio de los edificios en la zona de estudio, cerca del 43% de las edificaciones tienen entre 3 y 6 pisos de altura, alrededor del 38% entre 6 y 9 pisos de altura. Lo que nos muestra cómo la zona es densamente ocupada y como se muestra en los planos detallados, esta es una distribución constante en la mayor parte de la zona de estudio.
- Ahora, en términos de movilidad de acuerdo con la cantidad de viajes diarios realizados, se identifican claramente los agentes principales de la zona de estudio: peatones con aproximadamente el 24% de los viajes de la zona, usuarios de Transmilenio con alrededor del 16% de los viajes de la zona, Taxis (incluyendo informales) con cerca del 17% de los viajes de la zona, buses (SITP) con 15% de los viajes de la zona y finalmente los automóviles particulares con aproximadamente 15% de los viajes de la zona.

- Una conclusión adicional, de acuerdo con la evaluación realizada, evidencia que el sistema Transmilenio tiene solo 5 estaciones que se encuentran únicamente en el extremo occidental de la zona de estudio, así que el 16% de viajes descritos en el párrafo anterior, que son realizados en Transmilenio, alimentan la zona de estudio con peatones. Es decir que, para este caso, es pertinente considerar que los viajes peatonales no son solamente el 24%, sino que incluyen el 40% de los viajes totales de la zona de estudio.
- En cuanto a la infraestructura vial de la zona de estudio, se evidencia que cerca de 10 vías arteriales de la ciudad de Bogotá alimentan y atraviesan la zona: Autopista Norte, Carrera 7, Carrera 11, Carrera 15, Avenida NQS, Calle 72, Calle 85, Calle 92, Carrera 19. Así mismo, cerca de 40 vías intermedias complementan estas arterias principales, y finalmente cada una de las 375 manzanas de la zona de estudio tiene al menos 2 vías locales que las conectan con el resto de la malla vial.
- En cuanto al tráfico y congestión vial de la zona, inicialmente se evidencian jornadas pico de lunes a viernes entre 6am y 9am, lunes a viernes entre 11am y 2pm, lunes a viernes entre 4pm y 8pm, fines de semana congestión media durante todo el día, solamente altas congestiones en las zonas de uso nocturno y centros comerciales en horas puntuales del día. Sin embargo, en el planteamiento de escenarios e instancias del modelo se detallarán a fondo las jornadas y zonas específicas de alto tráfico del sistema.

Teniendo en cuenta la información recopilada de la zona de estudio y las conclusiones descritas, a continuación, se detalla cómo este levantamiento es incluido en los posteriores procesos de simulación:

- Caracterización de vías, es la base de la infraestructura vial de simulación: tipos de vías, velocidades máximas permitidas, número de carriles, sentidos de circulación, cruces permitidos; son considerados como variables de simulación.
- Uso de espacios y densidad de ocupación de áreas, permiten entender los resultados del proceso de análisis espacial que se realiza en Space Syntax. De igual forma, facilita el planteamiento de una propuesta de modificación de políticas de uso de malla vial viable: donde no se afecte la operación (ingresos, salidas, circulación) de zonas residenciales, de equipamientos especiales, o de áreas con densidades elevadas.

- Cantidad de viajes y medios de transporte, así como todo el tratamiento de datos descrito: permiten tener información real del comportamiento de los agentes (peatones, buses, taxis, vehículos particulares) de la zona de estudio. Se incluyen totalmente en el proceso de simulación: cantidades y tipos de viajes generados desde y hacia la zona de estudio, por franjas horarias y días de la semana. Es importante resaltar que los orígenes y destinos contemplados tienen en cuenta información externa de la zona de estudio, para que los datos resultados sean consistentes.
- Tráfico actual por franjas horarias y días de la semana. Esta información es referencia de comparación para identificar si el escenario base de simulación es coherente y puede ser considerado para la evaluación de posibles mejoras a implementar en la zona de estudio.

Capítulo 4.

DISEÑO DE PROPUESTA

Para el desarrollo de una propuesta de modificación de lineamientos de la actual malla vial de la zona de estudio, además de toda la información evaluada en el capítulo de caracterización del área, se emplea la metodología de análisis urbano de Space Syntax.

4.1 Análisis Espacial: Space Syntax

Space Syntax fue desarrollado para describir la ciudad a partir de su configuración espacial, como una variable independiente, pero definitiva en la organización de los sistemas sociales, lo cual permite observar el grado de influencia de los factores sociales en la configuración de la ciudad y explorar las consecuencias de cambios que quisieran evaluarse para el futuro. Los resultados obtenidos en los análisis empleando el modelo Space Syntax han ayudado a entender el funcionamiento de un sistema urbano, ya que la cantidad de movimiento peatonal o vehicular que registra cada una de las calles está fuertemente influenciada por sus valores de accesibilidad, al igual de su localización respecto a todo el sistema (Garnica Monroy, 2012).

De acuerdo a resultados obtenidos en análisis de muchas ciudades de todo el mundo empleando Space Syntax, se ha encontrado una fuerte correlación entre las mediciones obtenidas (accesibilidad –global y local- principalmente) y la dinámica u organización espacial de las ciudades, encontrando asociaciones directas entre algunos fenómenos urbanos como densidad poblacional, valores de suelo, usos de suelo, tráfico vehicular y peatonal, entre otros (Hillier & Vaughan, 2007).

Los parámetros espaciales analizados para el caso de estudio son: conectividad (connectivity), intermediación (choice) e integración (integration).

4.1.1 Conectividad

De acuerdo con Barbosa y Suarez (2021), la conectividad se define como el número de nodos que conectan directamente a un nodo dado, entiendo nodo, como una intersección puntual de vías en la zona de análisis. Space syntax considera la conectividad de un espacio como un factor determinante de su interacción espacial (Barbosa & Suarez Pradilla, 2021).

Space Syntax, para el presente caso de estudio entrega una gráfica de variable de conectividad, como se observa en la Figura 28, donde los valores más críticos, sujetos a evaluación y propuesta de modificación de lineamientos; se presentan en las vías de colores rojo, amarillo y naranja. Puntualmente las vías arteriales e intermedias principales de la zona: Carreras 11 y 15; Av NQS; Calles 72, 90 y 95.

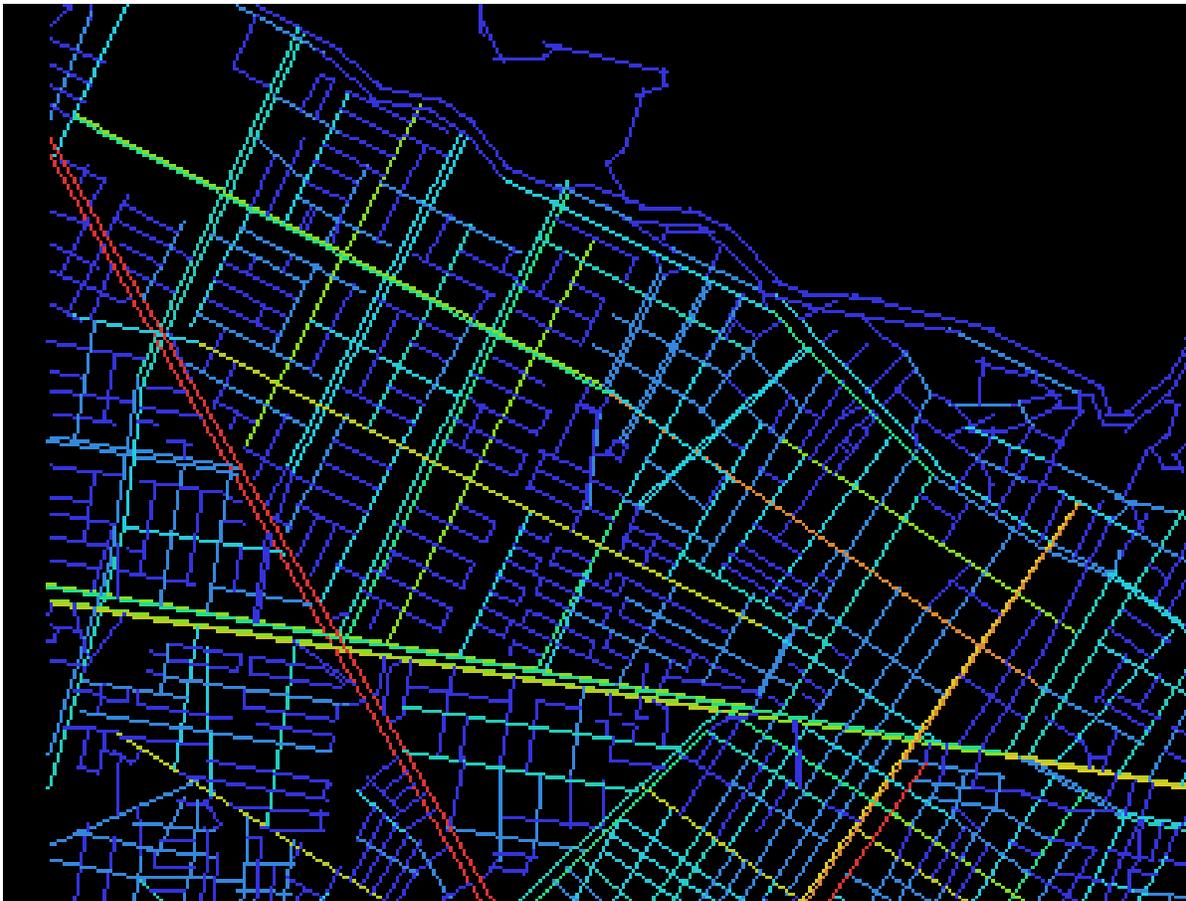


Figura 28. Space Syntax: Conectividad (Connectivity) de zona de estudio y sus alrededores.
Fuente: Simulación en Space Syntax.

4.1.2 Intermediación (Choice)

El parámetro de intermediación puede definirse como la relación entre el número de rutas más cortas entre dos puntos determinados, que incluyen un nodo específico; y el total de las rutas que existen entre estos dos puntos. (Barbosa & Suarez Pradilla, 2021).

Para el presente estudio, la variable de intermediación ha arrojado los resultados de la Figura 29, donde pueden observarse en amarillo, naranja y rojo las zonas con mayor índice de intermediación calculado. Lo que indica vías adicionales donde deben incluirse acciones de cambio; en este caso Calle 72 y 92; Carrera 11; Av NQS y Autopista Norte.

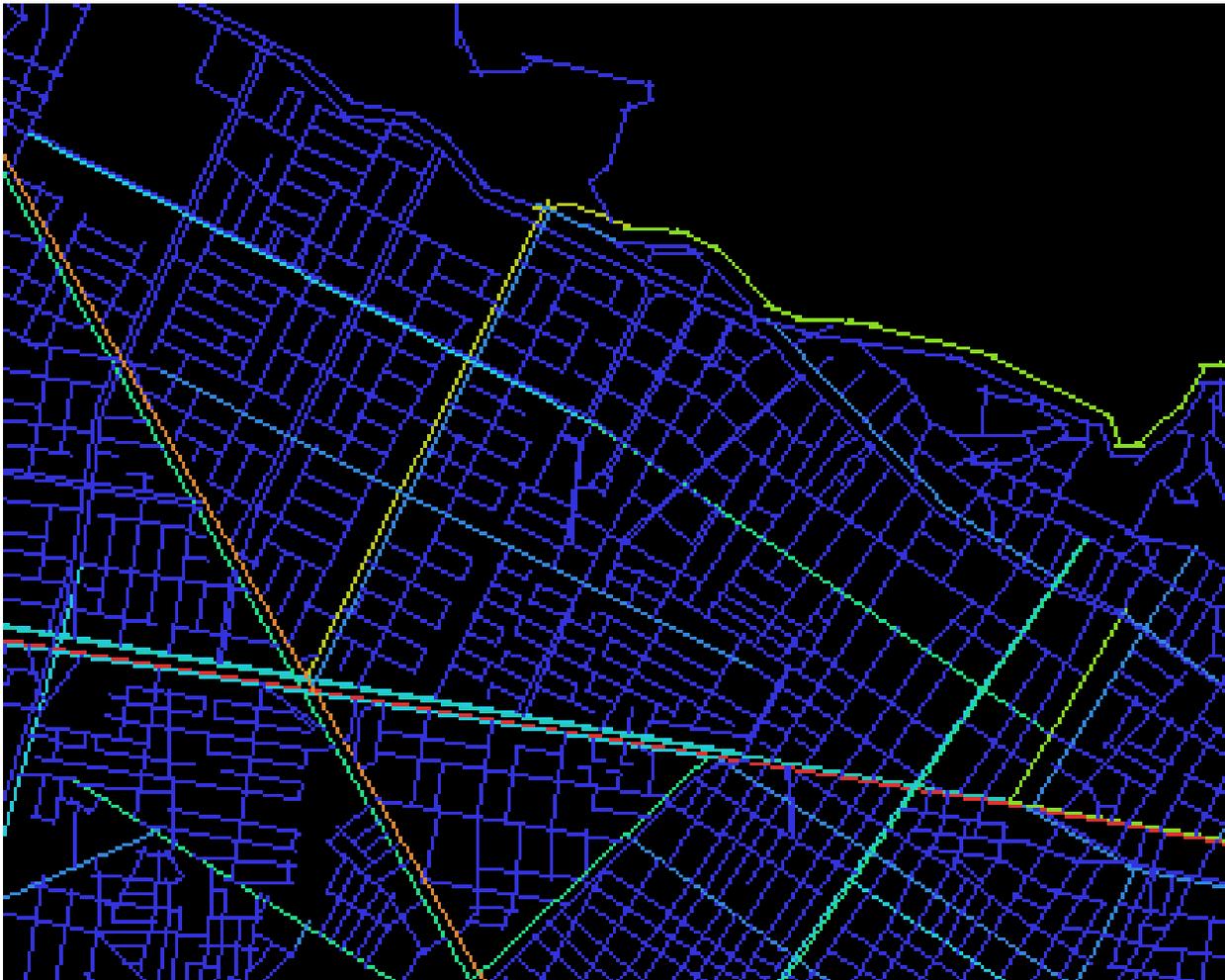


Figura 29. Space Syntax: Intermediación (Choice) de zona de estudio y sus alrededores.
Fuente: Simulación en Space Syntax.

4.1.3 Integración

La integración de una vía es una función de su profundidad relacionada con todas las otras vías, es decir, cuantas vías están lejos de todas las demás. (Barbosa & Suarez Pradilla, 2021).

En la Figura 30 se identifican las vías en rojo que requieren acciones de ajuste para mejorar este parámetro espacial. Sin embargo, se evalúan también los conjuntos de vías próximos, que presenten este indicador rojo o naranja, como es el caso de la zona comprendida entre la Calle 72 y la Calle 75, entre Carreras 11 y 15 (en nube azul en la Figura 30), en la cual podrían tomarse acciones zonales puntuales como cambio de uso de zona o de vías.

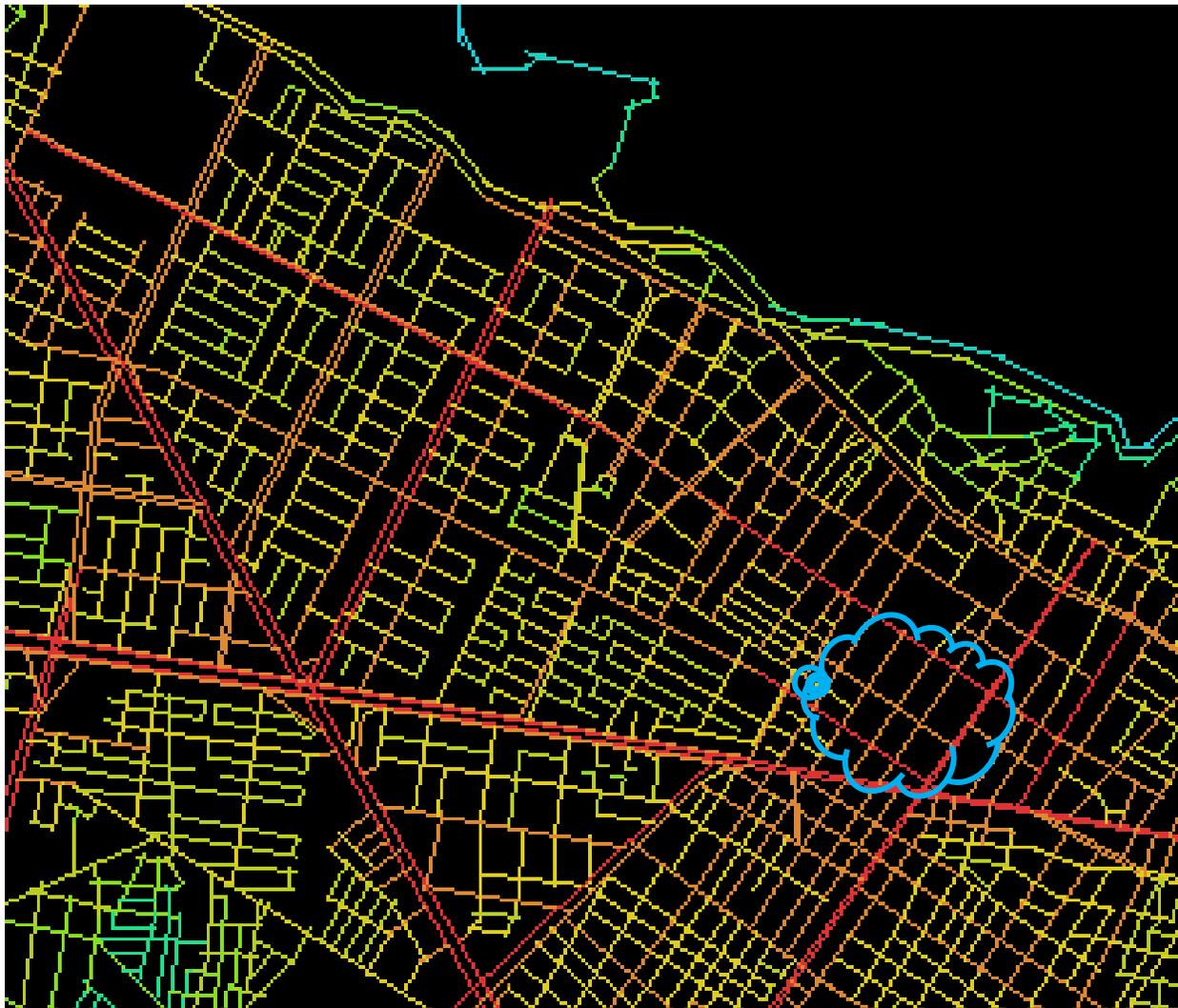


Figura 30. Space Syntax: Integración (Integration) de zona de estudio y sus alrededores.
Fuente: Simulación en Space Syntax.

Por otro lado, teniendo en cuenta todo el proceso de caracterización realizado, y el análisis de variables evaluado en Space Syntax se determina que las vías y zonas sujetas a modificaciones, dentro de la zona de estudio son las mostradas en la Figura 31 y detalladas a continuación:

- Calles: 72, 76, 82, 85, 90, 92, 94, y 100.
- Carreras: 11, 15, 19.
- Vías Arterias Principales: NQS y Autopista Norte.
- Zonas: entre Calle 72 y la Calle 75 y entre Carreras 11 y 15.

Es así como, se definen las siguientes acciones puntuales a simular en la zona de estudio, con el fin de encontrar una propuesta que mejore las condiciones de velocidad de circulación y de congestión de la malla vial actual:

- Para las vías marcadas en magenta en la Figura 31:
 - Revisión de uso exclusivo por tipos de vehículos. En este caso es posible controlar la circulación de los buses, y restringir la de los demás tipos de vehículo, en conclusión: Independización de un carril para circulación exclusiva de Buses.
 - Política de operación: independización puede evaluarse en franjas horarias o días puntuales, o cambio permanente para todos los días y horarios.
- Para la zona marcada en verde en la Figura 31:
 - Dado el uso de la zona: principalmente equipamientos (universidades y colegios), así como zona comercial alrededor. Se plantea optar por la opción de peatonalizar las vías incluidas en ella.

Es así como, las posibles acciones descritas, de baja inversión e impacto económico aplicadas a las vías identificadas por Space Syntax, podrían contribuir a los parámetros de Conectividad, Intermediación e Integración:

- Conectividad: Las vías identificadas por el análisis espacial son las que poseen mayor conectividad en la zona, es decir que tienen más conexiones directas con todas las demás vías del área de estudio. Es normal que sea en estas, donde se tengan los principales

corredores de servicio público. Al independizar un carril para este, se prioriza su uso, y así mismo se incentiva a nuevos usuarios su utilización. Disminuyendo el uso de taxis y vehículos particulares.

- **Intermediación:** Las vías identificadas con mayor índice de intermediación, son las que tienen un mayor potencial de generar un movimiento continuo y fluido en la ruta de un viaje. Nuevamente, priorizando el uso del transporte público en las mismas, permitirá realizar rutas más directas y rápidas en el servicio que mueve uno de los mayores volúmenes de agentes en la zona, el transporte público.
- **Integración:** en este caso, la mayoría de las vías de la zona muestran niveles medio-altos (amarillo y naranja) de integración. Es decir, que la mayoría de las vías de la zona de estudio se relacionan con todas las demás de una manera similar, se tienen muy pocas o casi nulas, que no se encuentran espacialmente integradas al área. Sin embargo, el área seleccionada se caracteriza por ser límite de vías que si presentan índices medios-altos (naranja y rojo) de integración. Éste tipo de zonas normalmente se encuentran ocupadas por densas áreas comerciales o de equipamientos. Con el fin de incentivar la integración urbana de esta zona, es recomendable tomar acción de peatonalización para disminuir la concentración alta de tráfico vehicular y mejorar la facilidad de circulación peatonal, completando su característica espacial, con su funcionalidad real.

Capítulo 5.

MODELO SIMULACIÓN MULTIAGENTES Y EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo se describen en detalle la modelación matemática del modelo de simulación, las variables incluidas, la lógica empleada en la simulación y el tratamiento experimental aplicado para la evaluación de los resultados simulados.

5.1 Definición Matemática del modelo

Se ha planteado el problema como se describe a continuación:

Se tiene un conjunto de usuarios que son considerados agentes que se mueven en la infraestructura vial $M = \{1 \dots i\}$, este conjunto de agentes puede ser de diversos tipos: Carro Particular MC , Bus (SITP e informales) MB , Taxi (formal e informal) MT y Peatón MP . Los Agentes M_i se movilizan en una infraestructura definida por Cruces $C = \{1 \dots x\}$ y Vías o Caminos $R = \{1 \dots y\}$, en múltiples días de la semana $D = \{1 \dots d\}$ y dentro de las 24 horas del día $T = \{1 \dots t\}$.

Los agentes tipo M_i son generados en la simulación basados en su probabilidad de creación $p_{Cr_{idt}}$, dada por el tratamiento de datos descrito en el Capítulo 3, sección 3.8, cada uno realiza un viaje desde un punto origen tipo C_x hasta un punto destino tipo $C_{x'}$, recorriendo múltiples caminos tipo R_y , con una probabilidad de asignación a un ZAT determinado $p_{Cr_{ix}}$ y $p_{DA_{ix'}}$, para origen y destino

respectivamente. Cada uno de estos agentes y variables tienen determinados parámetros y variables adicionales descritas a continuación.

5.1.1 Definición de Agentes

A continuación, en la *Tabla 11*, pueden verse el detalle de los agentes creados, su clasificación, descripción, subconjuntos y/o clasificaciones de cada uno.

Tabla 11. Listado y Descripción de Agentes del Modelo.
Fuente: Elaboración Propia

Variable	Tipo	Descripción	Subconjuntos/Clasificaciones
M_i	Agente	Agentes en Movimiento $\forall i \in M$ En la simulación se identifican como <i>Movers</i> . la cantidad de <i>Movers</i> varía con el tiempo de acuerdo con el momento de la simulación, basados en la encuesta de Movilidad del 2019.	MC_i Automóviles Particulares MB_i Buses MT_i Taxis MP_i Peatonos
C_x	Agente	Agentes fijos $\forall x \in C$, definen ubicaciones puntuales en el mapa, cruces de vías y puntos origen y destino de los viajes realizados por los <i>Movers</i> En la simulación se identifican como <i>CrossRoads</i> se encuentran alrededor de 4700 agentes de este tipo	"a" esquina nor-oriental de cruce "b" esquina suroriental de cruce "c" esquina suroccidental de cruce "d" esquina nor-occidental de cruce "od"ubicación definida como Origen/Destino
R_y	Link	Vías o caminos fijos $\forall y \in R$, interconectan <i>Crossroads</i> y formal la malla vial En la simulación se identifican como <i>Roads</i> se encuentran alrededor de 4700 links de este tipo	1 Vía tipo Arterial 2 Vía tipo Intermedia 3 Vía tipo Local

5.1.2 Definición de Parámetros y Variables

Para cada uno de estos agentes tipo M_i se consideran los siguientes parámetros, los cuales son datos reales resultado de la encuesta distrital de Movilidad realizada en la ciudad de Bogotá en el 2019:

Tabla 12. Descripción de probabilidades de creación de agentes y de asignación de orígenes y destinos.
Fuente: Elaboración Propia

Variable	Tipo	Descripción
$p_{Cr_{idt}}$	float	Probabilidad de creación de un M_i dentro de un día d y una hora específica t . $\forall i \in M, t \in T$.
$p_{Cr_{ix}}$	float	Probabilidad de creación de un M_i en un C_x dentro de un ZAT (Zona de Asignación Territorial), determinado. $\forall i \in M, x \in C$.
$p_{DA_{ix'}}$	float	Probabilidad de definición de destino de un M_i en un $C_{x'}$ dentro de un ZAT determinado. $\forall i \in M, x' \in C$.

Así como, para los agentes tipo C_x se tienen como parámetros fijos, en la *Tabla 13*, resultado del levantamiento de información descrito en el *Capítulo 3*.

Tabla 13. Parámetros fijos de Crossroads.
Fuente: Elaboración Propia.

Parámetro	Tipo	Descripción
C_{Type_x}	string	Tipo de Cruce: Origen/Destino o solo cruce vial. $\forall x \in C$.
ZAT_x	int	Área al que pertenece, definido como ZAT para poder aplicar las probabilidades de asignar dicho C_x como un Origen o Destino específico. $\forall x \in C$.

Así mismo, en la *Tabla 14*, para cada uno de los agentes tipo R_y se consideran estos parámetros son fijos y también son el resultado del levantamiento de información descrito en el *Capítulo 3*:

Tabla 14. Parámetros fijos de Roads.
Fuente: Elaboración Propia.

Parámetro	Tipo	Descripción
R_{Type_y}	int	Tipo de Vía (Arterial, Intermedia o Local), la cual define la velocidad máxima del tipo de vía $\forall y \in R$.
$Lines_y$	int	Cantidad de Carriles de una vía $y \forall y \in R$.
$SITP_flag_y$	int	Bandera que indica si la vía tiene circulación de Buses SITP, 0 si no circulan buses en ella, 1 si si tiene circulación de buses $\forall y \in R$.
$Capacity_{TOTAL_y}$	int	Capacidad total de vehículos en determinada vía, dada como una constante de #Carriles por capacidad de vehículos por carril. $\forall y \in R$.

Adicionalmente, ver en la *Tabla 15*, las siguientes variables de agentes y de la malla vial que se actualizan durante la simulación:

Tabla 15. Variables Adicionales del Modelo. Aplicación en Agentes y Roads.

Elaboración Propia.

Variable	Tipo	Descripción
D_d	string	Día de la semana que se realiza la simulación $\forall d \in D$
T_t	int	Hora del día $\forall t \in T$
HI_{tid}	int	Franja Horaria de inicio de viaje, de un M_i dentro de un día d y una hora t . $\forall i \in M, t \in T, d \in D$.
HF_{tid}	int	Franja Horaria de finalización de viaje, de un M_i dentro de un día d y una hora t . $\forall i \in M, t \in T, d \in D$.
$Life_i$	int	Tiempo total del viaje realizado por un M_i , dado por $HF_{tid} - HI_{tid}$, dentro de un día d y una hora t . $\forall i \in M, t \in T, d \in D$.
$Route_i$	Array [C_x]	Ruta Calculada de acuerdo con el tráfico y congestión de las vías en el momento de creación del agente M_i . $\forall i \in M$.
$V_{C_{iy}}$	float	Velocidad Actual de Desplazamiento de un M_i en determinada vía R_y de acuerdo con el índice de congestión de la vía. $\forall i \in M, y \in R$.
L_{T_i}	int	Distancia total recorrida por un M_i al finalizar el viaje. $\forall i \in M$
V_{P_i}	float	Velocidad Promedio de Desplazamiento de un M_i en todo su trayecto recorrido. $\forall i \in M$.
$Capacity_{Current,y}$	Int	Capacidad de vehículos actual. $\forall y \in R$.
$k_{congestion,y}$	float	Índice de congestión actual. $\forall y \in R$.

5.2 Simulación

El desarrollo del presente proyecto y las simulaciones a realizar, buscan:

- Definir un modelo base con los datos actuales descritos en la caracterización de la zona: tráfico actual, infraestructura vial actual (sentidos, capacidades, usos), volumen de usuarios actuales, flujos actuales de movimiento.

- Al simular el escenario actual, se busca identificar la línea base para futuras comparaciones, línea base compuesta por: V_{P_i} Velocidades Promedio de Desplazamiento de los M_i , L_{T_i} Distancias totales recorridas por los M_i , $Life_i$ tiempo total promedio de los viajes realizados y variables generales de congestión promedio de las vías $k_{congestion}$.
- Realizar el mismo proceso con el nuevo escenario planteados en el Diseño de la Propuesta (Capítulo 4).
- Para finalmente comparar los resultados de los nuevos escenarios con la línea base.

Por la tanto, y en consecuencia con el análisis y la literatura consultada en el Estado del Arte (Capítulo 2), se desarrolla el problema con un software especializado para la simulación multiagente, en este caso, Netlogo.

5.2.1 Simulación Basada en Agentes: Netlogo

De acuerdo con la descripción se su sitio oficial, (Wilensky, 1999). NetLogo es un entorno de modelado programable para simular fenómenos naturales y sociales. Fue escrito por Uri Wilensky en 1999 y ha estado en continuo desarrollo desde entonces en el Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling.

NetLogo es especialmente adecuado para modelar sistemas complejos que se desarrollan a lo largo del tiempo. Los modeladores pueden dar instrucciones a cientos o miles de "agentes", todos operando de forma independiente. Esto permite explorar la conexión entre el comportamiento a nivel micro de los individuos y los patrones a nivel macro que surgen de su interacción.

NetLogo es lo suficientemente simple para estudiantes y profesores, pero lo suficientemente avanzado como para servir como una herramienta poderosa para investigadores en muchos campos. Estas simulaciones abordan áreas de contenido en las ciencias naturales y sociales, incluida la biología y la medicina, la física y la química, las matemáticas y la informática, y la economía y la psicología social.

NetLogo es la próxima generación de la serie de lenguajes de modelado de múltiples agentes, incluidos StarLogo y StarLogoT. NetLogo se ejecuta en la máquina virtual de Java, por lo que funciona en todas las plataformas principales (Mac, Windows, Linux, et al). Se ejecuta como una aplicación de escritorio. También se admite la operación de línea de comandos y su interacción con lenguajes de programación como Python.

5.2.2 Descripción detallada del Modelo de Simulación

Para iniciar la descripción del modelo, es necesario aclarar, ya que el alcance de la presente investigación se centra en la malla vial, solamente se simularán: Agentes que se movilizan sobre las vías: para este caso: Automóviles particulares, Buses de Servicio público y Taxis (formales e informales).

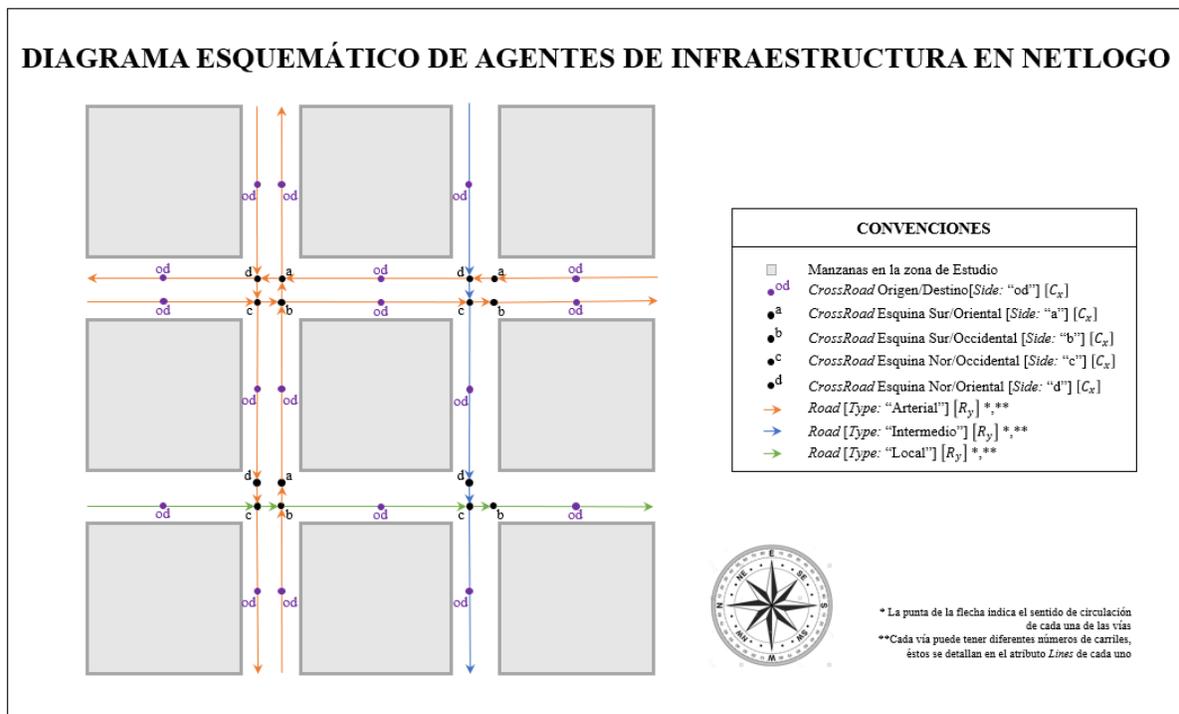


Figura 32. Diagrama esquemático de agentes de infraestructura en Netlogo. Fuente: Elaboración Propia

En esta medida y para comprender de mejor manera como se han incluido cada uno de estos agentes en la simulación, en la Figura32 se describe en un esquema de la infraestructura vial, los

agentes fijos: Crossroads (Cruces), Roads (Vías) y en la Figura 33, se muestran los agentes en movimiento sobre la infraestructura descrita: Carros, Buses y Taxis.

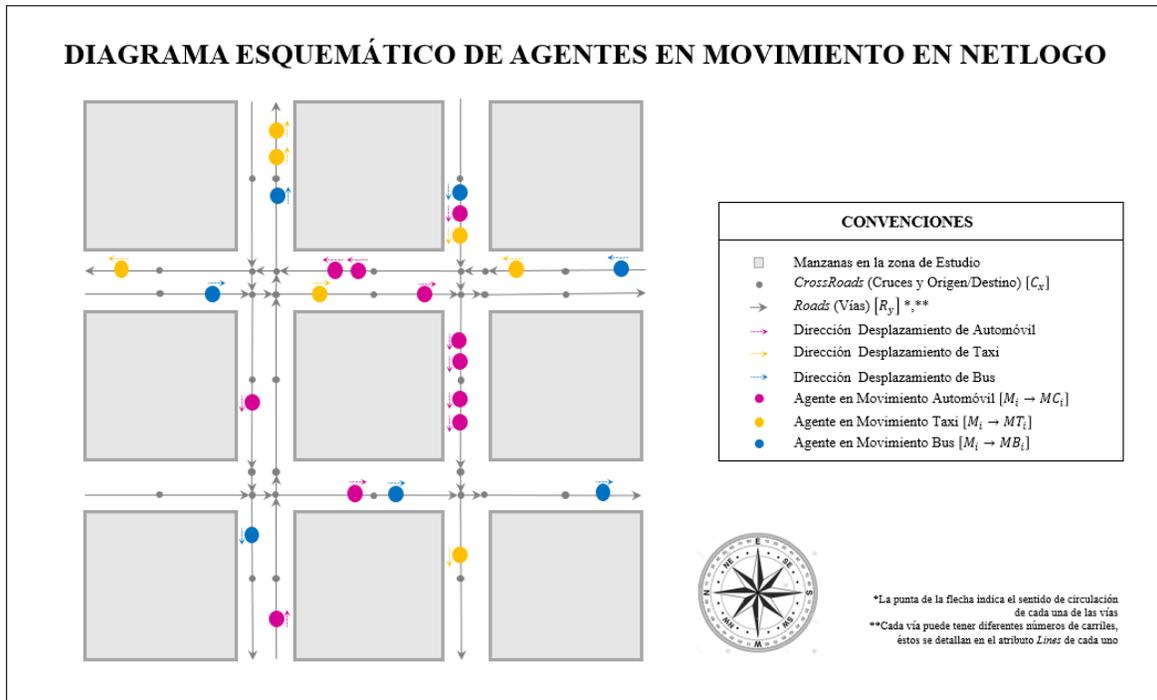


Figura 33. Diagrama esquemático de agentes de infraestructura en Netlogo. Fuente: Elaboración Propia

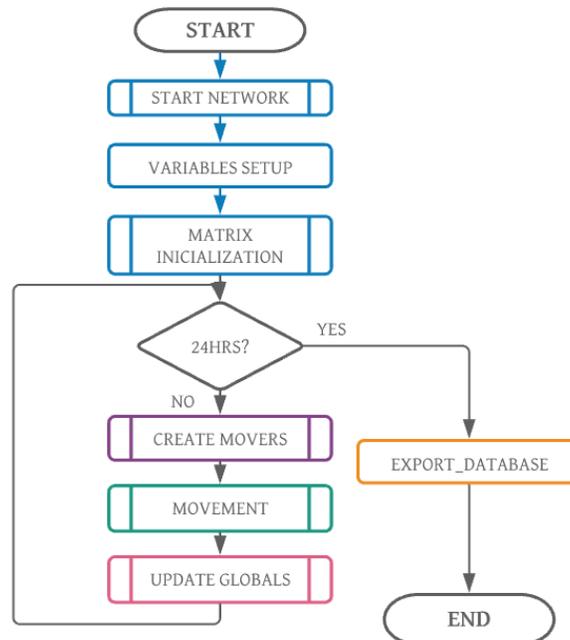


Figura 34. Proceso general desarrollado en el software de simulación Netlogo. Fuente: Elaboración Propia

Luego en la Figura 35, en un diagrama de entidad-relación, se detallan los atributos y principales interacciones desarrolladas por cada uno de los agentes previamente definidos en la simulación.

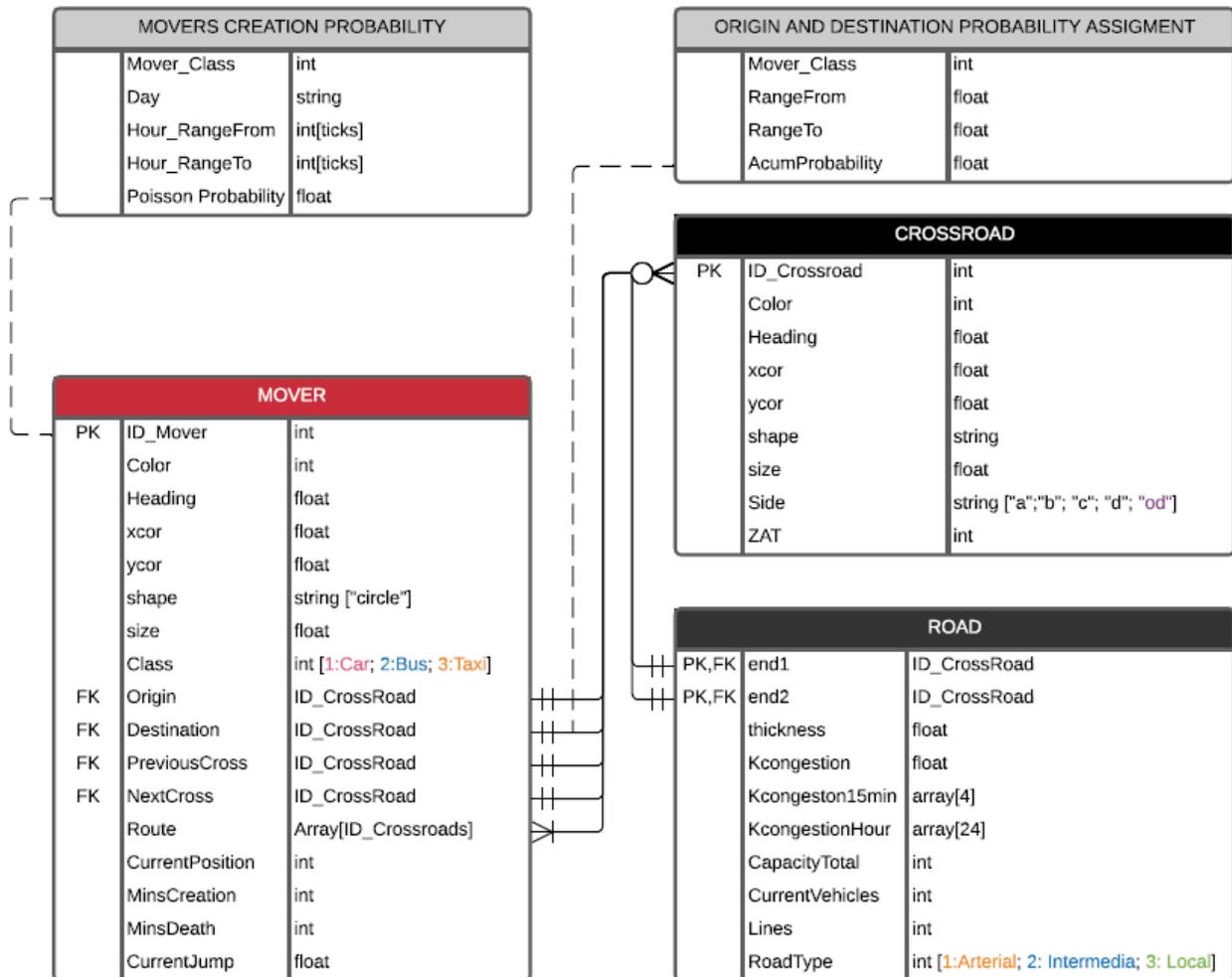


Figura 35 Diagrama Entidad - Relación de Agentes en Simulación Netlogo. Disponible en detalle en el Anexo 15.
Fuente: Elaboración Propia

Los cuales interactuarán en los procesos que a continuación, se describen en detalle en cada uno de los siguientes diagramas de flujo, iniciando con el proceso general que realiza el software por día de simulación en la Figura 34, en la cual se describe que el programa realiza una configuración básica inicial (recuadros en azul), en la que construye la red de vías y cruces, realiza una inicialización general de todas las variables y carga las matrices principales de datos. Detalle en la Figura36:

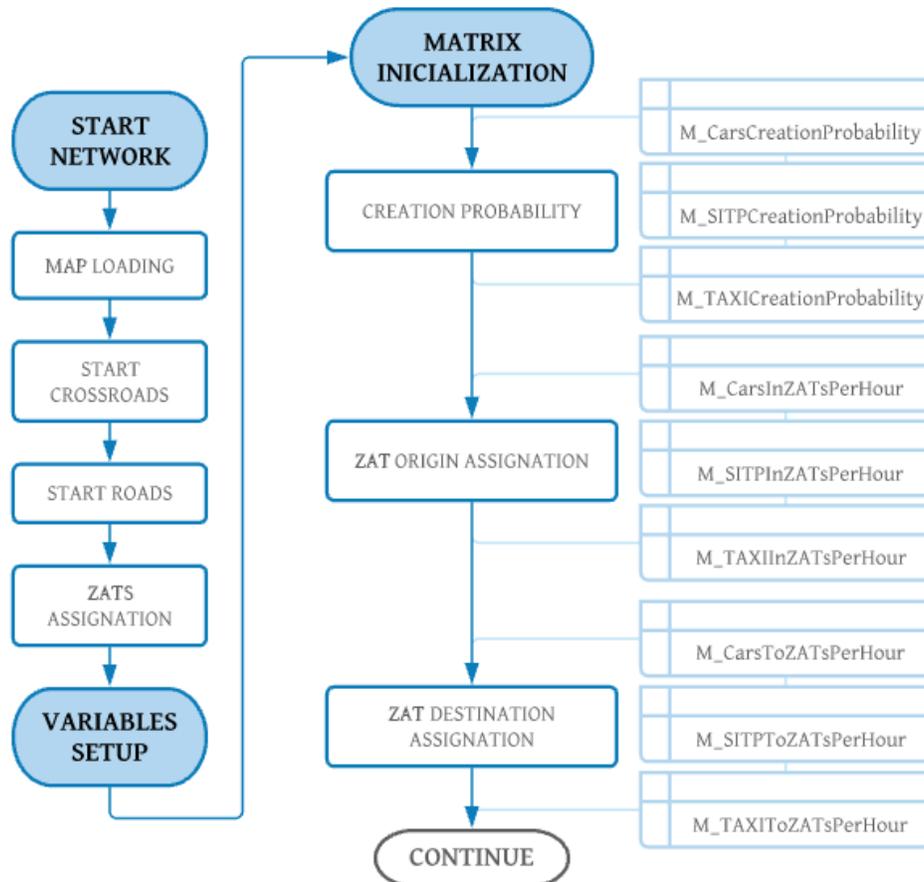


Figura 36. Procesos de Inicialización de Parámetros, Visualización y Variables en Netlogo.
Fuente: Elaboración Propia

Las funciones “Start Network” y “Variables Setup”, son responsables de la inicialización de la interfaz gráfica y lógica de la simulación, en ellas se realiza el cargue del mapa de la zona de estudio, se cargan las ubicaciones exactas de las vías y sus intersecciones, así como todos los posibles puntos de origen y destino de los posibles agentes en movimiento que se creen en cada iteración de la simulación. Toda esta información viene dada por el levantamiento real de los datos realizados en el capítulo 3, de Caracterización de la Zona de Estudio: capacidad real de vías, características, límites de velocidad, dirección, sentido, número de carriles, zona de asignación territorial de cada punto, entre otros.

La función “Matrix Inicialization” también toma información real, en este caso de la encuesta de movilidad realizada en Bogotá en el 2019 (Movilidad, 2019), pero toma la información luego de realizar el tratamiento de datos descrito en el capítulo 3, que permitió extraer el detalle de tráfico

real de la zona de estudio, las funciones de probabilidad que permiten determinar cuántos agentes deben crearse en cada instante de tiempo, y las probabilidades de asignar un origen y un destino específicos a cada agente. Estas informaciones son cargadas a un grupo de 9 matrices dentro del software, que serán más adelante consultadas en cada instante de tiempo durante la simulación.

Tabla 16. Ejemplo de tabla de probabilidades de creación de automóviles durante cada hora del viernes.
Fuente: Elaboración Propia

HORA	TICKS DESDE	TICKS HASTA	Poisson
0:00	0	30000	0,00000000
1:00	30000	60000	0,00000000
2:00	60000	90000	0,00000000
3:00	90000	120000	0,00000000
4:00	120000	150000	0,00467592
5:00	150000	180000	0,05616600
6:00	180000	210000	0,09938181
7:00	210000	240000	0,13252535
8:00	240000	270000	0,12708737
9:00	270000	300000	0,13116904
10:00	300000	330000	0,12845005
11:00	330000	360000	0,13116904
12:00	360000	390000	0,13792946
13:00	390000	420000	0,13792946
14:00	420000	450000	0,14730577
15:00	450000	480000	0,12435561
16:00	480000	510000	0,12435561
17:00	510000	540000	0,15261780
18:00	540000	570000	0,16183434
19:00	570000	600000	0,13387955
20:00	600000	630000	0,11748874
21:00	630000	660000	0,08377069
22:00	660000	690000	0,05763940
23:00	690000	720000	0,03076282

Luego de esta parametrización general, inicia el proceso que se repite 500 veces por minuto (tiempo de simulación), durante en total 24horas de cada día a simular. Este proceso se resume en: creación de agentes en movimiento (“*Create_Movers*” en la *Figura 37* y *Figura 38*), desplazamiento de los agentes en infraestructura vial (“*Movement*” en la *Figura 40*) y actualización de variables globales del software (“*Update_Globals*” en la *Figura 41*).

En la función “*Create_Movers*”, se consultan las matrices de probabilidad de creación de cada uno de los agentes en movimiento, definidas en la función de “*Matrix_Inicialization*”, en este caso, de acuerdo con el instante de tiempo en el que se encuentre la simulación, se consulta la probabilidad de generación de cada tipo de vehículo para entrar a las subfunciones específicas de crear

automóviles “Create_Cars”, buses “Create_Bus” o taxis “Create_TAXIs” en cada caso. Importante resaltar que, ya que se ha definido que cada minuto en la simulación equivale a 500ticks, la *Tabla 18*, muestra el rango de horas en múltiplos de 30.000ticks por hora.

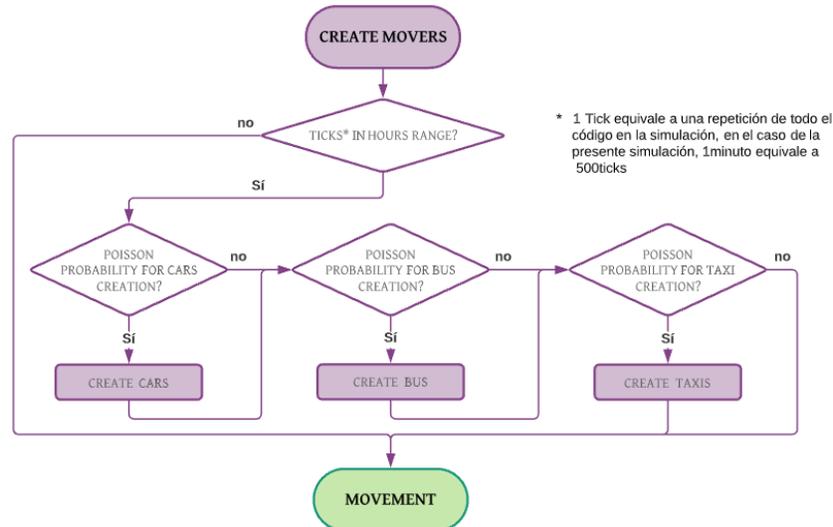


Figura 37. Procesos de Creación de Agentes en Movimiento en Netlogo. Fuente: Elaboración Propia

Así mismo, en la *Tabla 16*, puede evidenciarse el ejemplo de la probabilidad de creación de automóviles o carros particulares en cada hora durante el viernes. Cada día de la semana tiene un cálculo de probabilidad de creación de carros diferente, que se carga en cada iteración de la simulación como la matriz $M_CarsCreationProbability$, la cual es creada en el proceso de configuración de la simulación. Así mismo, se cargan las informaciones de Buses $M_SITPCreationProbability$ y Taxis $M_TAXICreationProbability$. El detalle de cada tabla, para cada día, puede evidenciarse en el *Anexo 14 Tratamiento de Datos para simulación*. Luego de verificar la probabilidad de creación de cada agente, y crearlo en cada subfunción, la simulación pasa a la función de dar movimiento a los agentes existentes en el plano.

En las subfunciones específicas de *Create_Cars*, *Create_BUS* y *Create_TAXI*; se cargan para cada uno de los agentes, sus características principales: tamaño, color, minuto de creación, su clasificación (*Mover* como agente carro, bus o taxi), y como información real adicional, basada en la Encuesta de Movilidad del 2019 (Movilidad, 2019) su ZAT de origen y su ZAT de destino, con el fin de distribuir los agentes en la zona de estudio de acuerdo con información real. Estas probabilidades también vienen dadas por información cargada en las matrices iniciales: $M_CarsInZATsPerHour$, $M_SITPInZATsPerHour$, $M_TAXIInZATsPerHour$,

$M_CarsToZATsPerHour$, $M_SITPToZATsPerHour$, $M_TAXIToZATsPerHour$, para cada tipo de agente, carros, buses y taxis respectivamente. Un ejemplo de estas informaciones puede evidenciarse también en la *Tabla 17*. Así mismo, el detalle de esta información puede verse en el *Anexo 14 Tratamiento de Datos para simulación*.

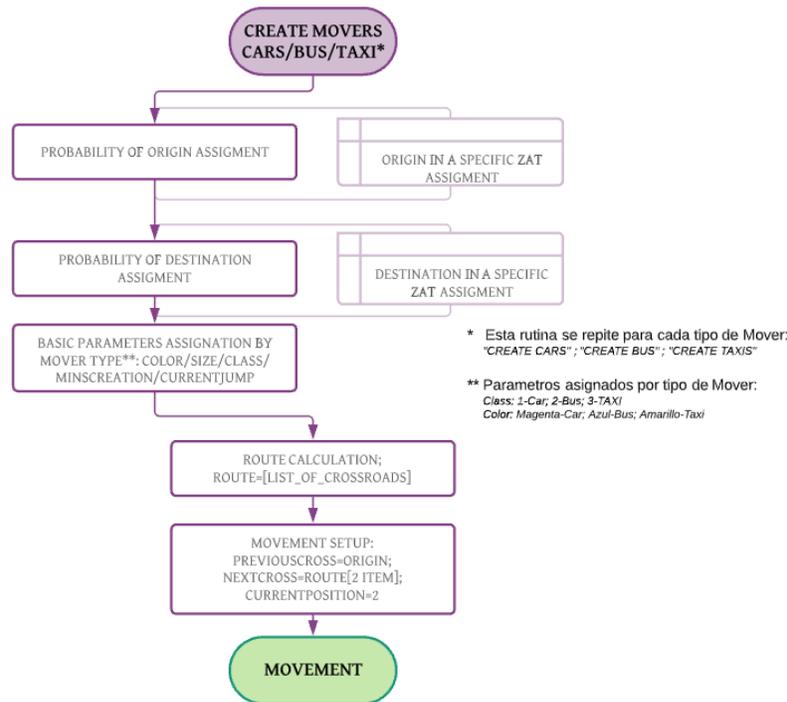


Figura 38. Subprocesos de Creación de Agentes en Movimiento en Netlogo. Fuente: Elaboración Propia

Una vez se asignan los parámetros generales de cada *Mover* se calcula su atributo *Route*, que es la ruta más corta de acuerdo con el destino seleccionado y el tráfico en el momento de su creación, esta dada por un vector de *Crossroads*, el cual inicia con la posición de *Origen* y finaliza con la posición *Destino*, pasando por un listado de los *Crossroads* por los que debe pasar.

$$Route = [Origin, C_1, C_2, C_3, \dots, \text{PreviousCross}, \text{NextCross}, \dots, C_x, Destination]$$

CurrentPosition
↗

Figura 39. Descripción de atributo *Route* de *Mover*, el cual consiste en un vector de *Crossroads*. Fuente: Elaboración Propia

En el cálculo de la ruta es importante considerar que, dependiendo el tipo de vehículo, este cálculo cambia ya que los Buses no tiene libre circulación por las vías, solamente pueden seguir una ruta

específica, mientras que los taxis y vehículos si pueden circular por la mayoría la malla vial de la zona de estudio. Mediante el atributo *SITP_flag*, el software de simulación determina que vías pueden incluirse en el cálculo de la ruta y cuales no, por tipo de vehículo. En la Figura 39 se detallan las vías con circulación de Buses.

Tabla 17. Ejemplo de tabla de probabilidades de asignación de un ZAT como destino de automóviles de la zona de estudio para el viernes. Fuente: Elaboración Propia.

TOPE DE RANGO	RANGO DESDE	RANGO HASTA	ZAT
0,0689467	0,0000000	0,0689467	163
0,1099343	0,0689467	0,1099343	164
0,1427382	0,1099343	0,1427382	165
0,1598839	0,1427382	0,1598839	166
0,2275421	0,1598839	0,2275421	241
0,2824504	0,2275421	0,2824504	242
0,2940360	0,2824504	0,2940360	243
0,3403258	0,2940360	0,3403258	245
0,3983336	0,3403258	0,3983336	246
0,4907479	0,3983336	0,4907479	247
0,5096981	0,4907479	0,5096981	256
0,5325827	0,5096981	0,5325827	257
0,6518861	0,5325827	0,6518861	258
0,7545012	0,6518861	0,7545012	259
0,7617495	0,7545012	0,7617495	260
0,8185135	0,7617495	0,8185135	261
0,8330088	0,8185135	0,8330088	262
0,8436778	0,8330088	0,8436778	263
0,9118681	0,8436778	0,9118681	847
1,0000000	0,9118681	1,0000000	849

Luego del proceso de creación, la simulación se encarga de poner en movimiento todos los agentes que se encuentran activos en la red, mediante la función “Movement”, la cual se encarga de ir moviendo cada agente Mover de acuerdo con las informaciones almacenadas en los atributos Route de cada agente. Para comprender la lógica de esta función, considerar como ejemplo la Figura 39, donde en un determinado momento de la simulación, un agente determinado se encuentra en CurrentPosition, es decir sobre un Road que está entre dos Crossroads, el primero es necesariamente el último por el que cruzó al que se denomina PreviousCross y el segundo es el siguiente elemento en la ruta, asignado como NextCross. Aquí, siguiendo el proceso de la Figura 41, el programa le pregunta a cada Mover si se encuentra ya sobre el punto NextCross, si no,

simplemente sigue avanzando hacia él con la velocidad dada por *CurrentJump*. En caso de que su posición si sea *NextCross*, se evalúa si *NextCross* ya es la misma posición del Destino, si es así, el agente muere en el software y toda su información es cargada en la base de datos principal de la simulación, si aún no es el *Destino*, actualiza las variables *PreviousCross* a su posición actual y *NextCross*, al nuevo “siguiente” en el vector *Route*. Finalmente sale de esta función hacia la siguiente *Update_Globals*.

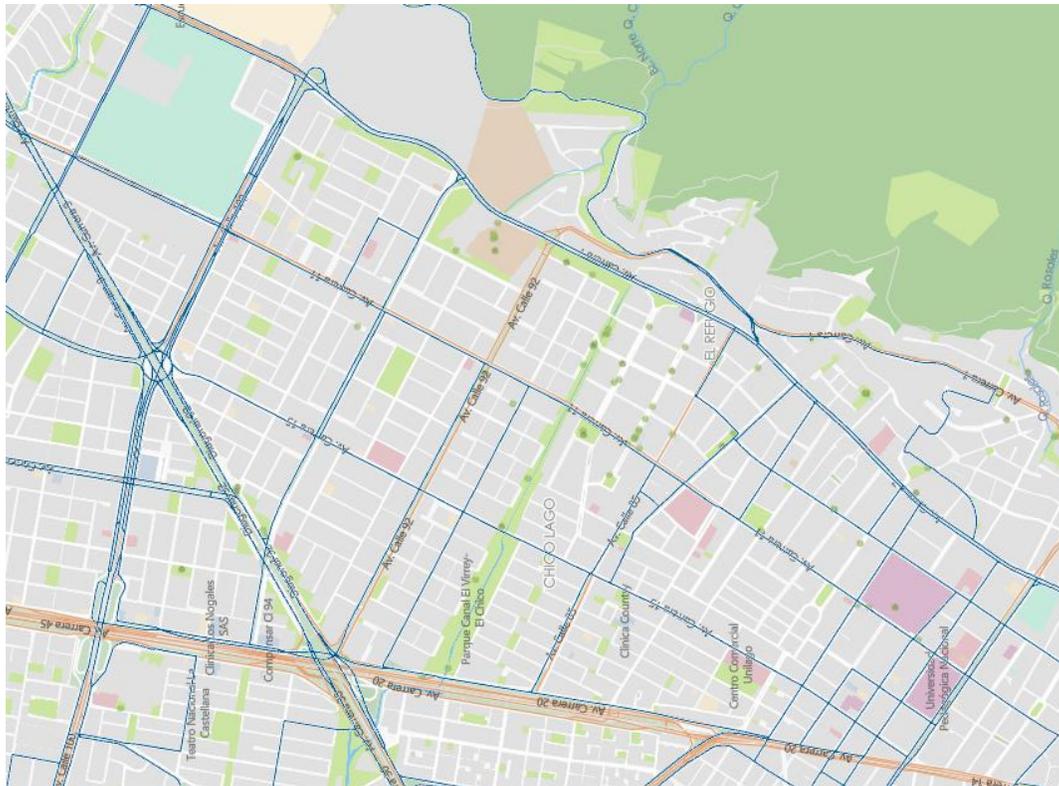


Figura 40. Vías con circulación de Buses en la Zona de Estudio (en azul en imagen). Todas son compartidas con otro tipo de vehículos, excepto la Cra 7, la cual tiene un carril dedicado para buses. Fuente: Mapas Bogotá. Rutas Zonales del SITP. Bogotá D.C. Año 2021 (bogota.gov.co)

Update_Globals, como se describe en la Figura 42 tiene como función principal medir el tráfico en cada vía y de acuerdo con éste, determinar el valor de velocidad *CurrentJump* de cada *Mover* y el parámetro de congestión *kcongestion* de cada *Road* en cada instante de tiempo. Adicional a esto cada *Road*, tiene un parámetro vector de 24 posiciones, *kcongestionHour*, en el cual se almacena la congestión promedio de cada hora, que es el resultado del promedio de 4 medidas de congestión de cada 15 minutos dentro de la misma hora, esto con el fin de completar el registro general del tráfico de cada escenario simulado.

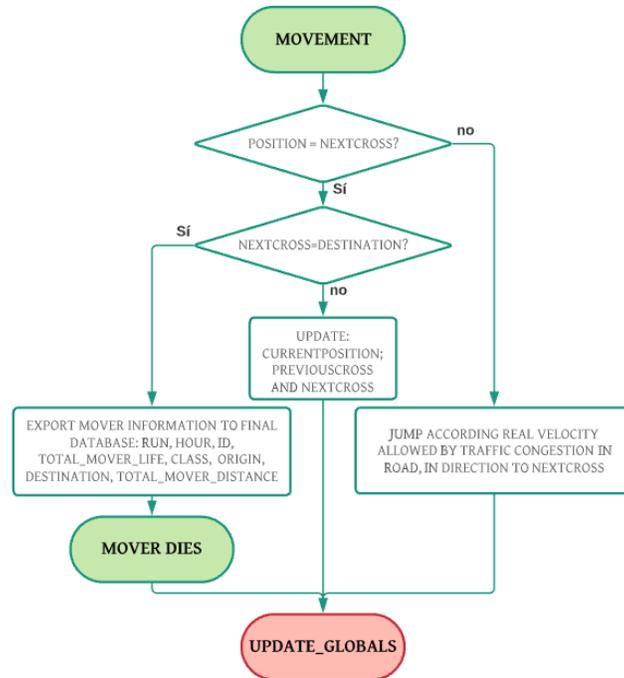


Figura 41. Proceso para el Movimiento de Agentes en Netlogo. Fuente: Elaboración Propia

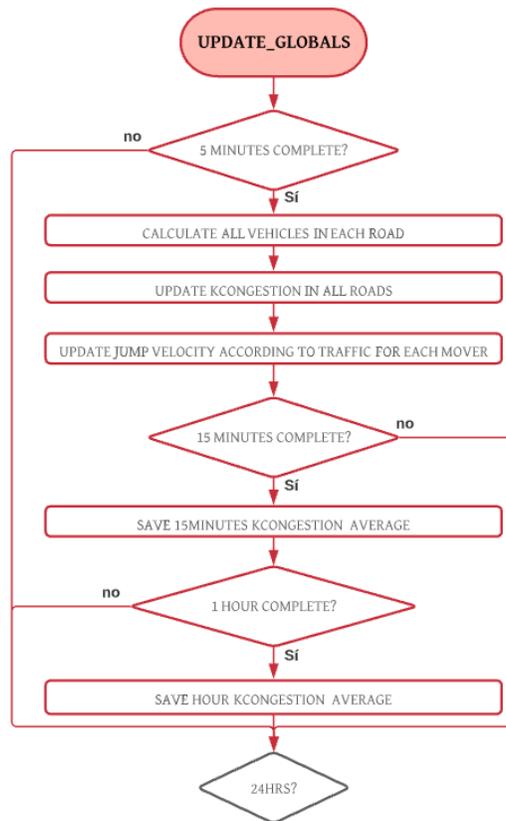


Figura 42. Proceso de Actualización de variables globales en Netlogo. Fuente: Elaboración Propia

Para el escenario de simulación, la velocidad de cada *Mover* se asume con una función lineal que depende de la cantidad de vehículos en cada vía como se describe en la *Figura 43*.

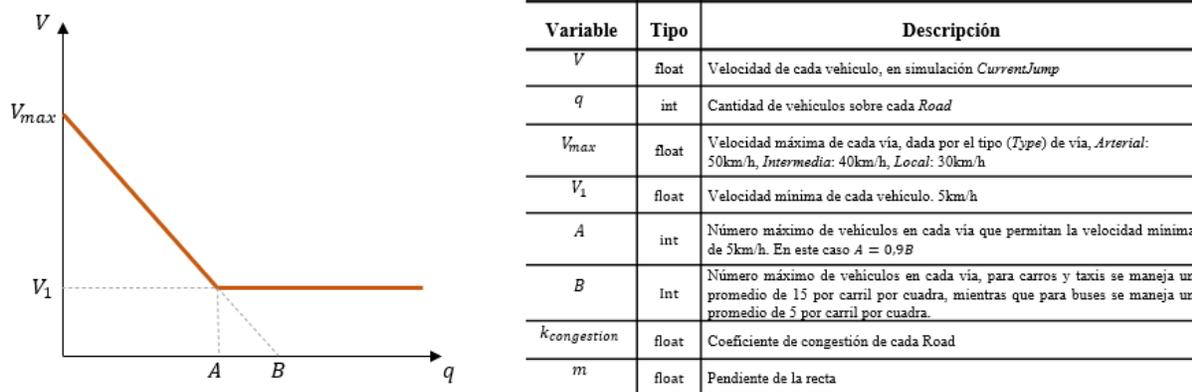


Figura 43. Gráfica y descripción de variables para cálculo de posibles valores de velocidad de cada *Mover* dentro de la simulación en Netlogo. Fuente: Elaboración Propia

Desde la creación de agentes, hasta la actualización de variables globales se repiten una vez en cada *tick* hasta que se completan las 24 horas de cada día de simulación. Al finalizar cada día, se realiza la exportación de datos completa que será el punto base de comparación con los escenarios propuestos, para así verificar si es posible mejorar las condiciones de congestión y velocidad de desplazamiento en la zona de estudio.

5.2.3 Supuestos y Limitaciones del Modelo de Simulación

El modelo pretende acercarse lo máximo posible a la realidad. Sin embargo, por capacidad de procesamiento, complejidad de información y limitaciones de capacidad del software no es posible, incluir en el presente proyecto todas las variables del sistema. Por lo tanto, a continuación, se resumen las limitaciones y supuestos asumidos en el proceso de simulación.

Limitaciones:

- No se incluye semaforización.
- No se considera la circulación de peatones en las vías vehiculares, ni interacción de peatones en el tráfico vehicular.

- No se considera la circulación de motos, ni bicicletas, ni patinetas, ni sus interacciones con el presente modelo.
- No se consideran las situaciones donde la velocidad de circulación sea cero.
- No se incluyen modos diferentes de cálculo de ruta al especificado, todos los agentes siguen la misma lógica.
- No se incluyen las paradas de buses.
- No se incluyen otros tipos de vehículos como camiones y carga.

Supuestos

- Velocidad lineal para todos los vehículos y velocidad mínima de circulación de 5km/hora
- Todos los Buses se asumen del mismo tamaño, ocupando en promedio el espacio de 3 vehículos particulares.
- Todos los carros y taxis se asumen del mismo tamaño.
- La capacidad máxima de cada carril de una vía se asume igual, 5 Buses, 15 Carros o Taqxis o la combinación de ambos. Sin diferenciar la longitud de cada cuadra. Promedio 100metros por cuadra.
- Todos los agentes usan el mismo modo de cálculo de ruta, la ruta más corta disponible.
- Los orígenes y destinos de los buses se calculan sobre las vías donde los buses circulan, sin tener en cuenta los paraderos específicos.

5.2.4 Consideraciones Especiales Para Simulación de Escenarios: Base vs Propuesta

Para poder simular la propuesta de modificación planteada, fue necesario realizar modificaciones a la simulación base, a continuación, se describen los cambios realizados en el modelo para simular la nueva condición:

- **Uso de carriles dedicados para Buses:**

Para dedicar carriles de vías exclusivos de buses, se extendió la política implementada en la carrera 7, donde un carril dedicado se simula como una red independiente que no interactúa con la vía de Carros particulares ni Taxis. Como se observa en la Figura 44, se altera también la cantidad de

carriles disponible de la vía, por ejemplo, si en el escenario base una vía tiene 3 carriles y por ellos circulaba cualquier tipo de vehículo, la capacidad total de la vía era compartida entre los 3 tipos de vehículos. Ahora, en la propuesta, esta vía pasa a tener 2 redes: la primera con un solo carril donde solamente pueden circular buses, con capacidad máxima de 5 buses por cuadra; mientras que la red paralela solo tendría 2 carriles para circulación de carros y taxis, con capacidad de 15 vehículos por carril. Los orígenes y destinos de cada viaje siguen contemplando los puntos que se encuentran solamente en cada tipo de vía. Así mismo, dentro de la simulación en los cálculos de Ruta se tienen en cuenta estas divisiones de vías, proporcionando a cada agente la ruta más corta a recorrer, con menos cantidad de tráfico, de acuerdo con los tipos de vía y los carriles en que puede circular cada agente.

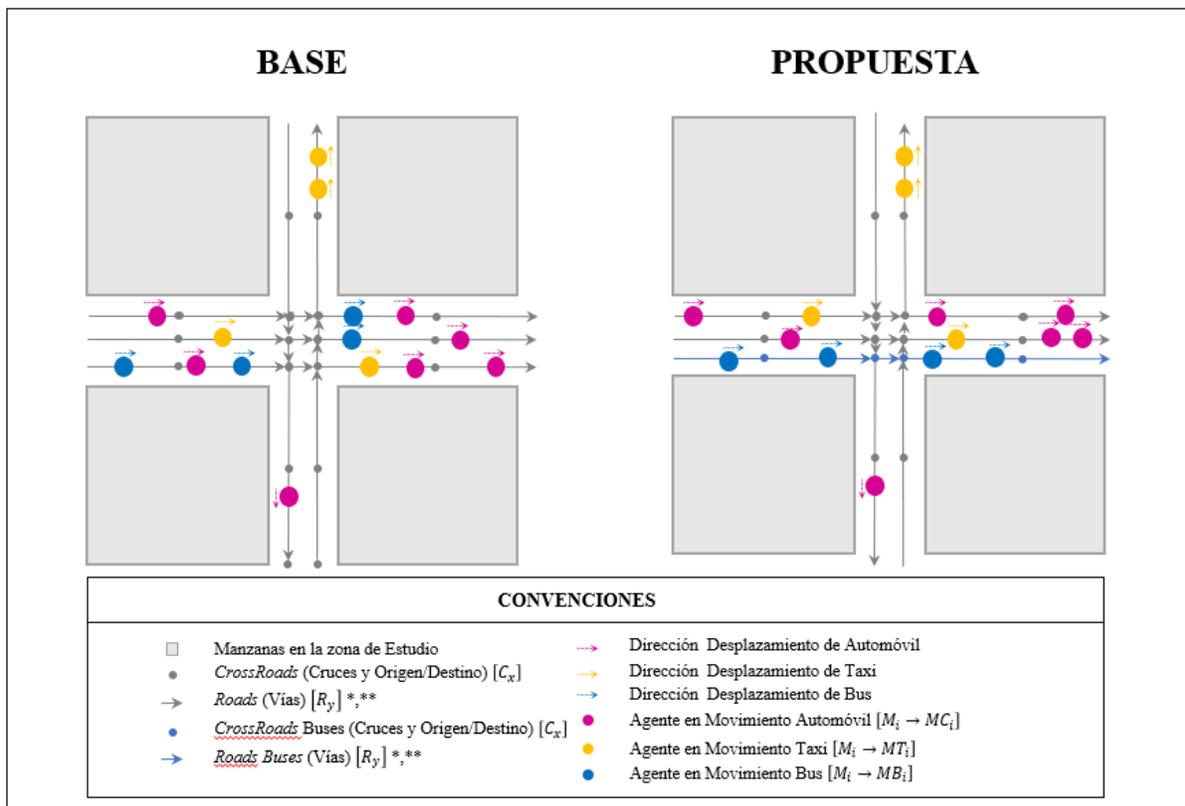


Figura 44. Comparación de cambio de la infraestructura vial para las vías con servicio de buses. Base vs Propuesta.
Fuente: Elaboración Propia

• **Peatonalización de vías:**

En cuanto a la peatonalización de vías el nuevo escenario elimina las vías seleccionadas, dejan de formar parte de la infraestructura vial, para considerarse como peatonales. Los posibles orígenes

y destinos que se contemplaban en esa zona se suman a la zona aledaña más cercana que sea parte de la nueva infraestructura vial. Estos cambios se explican en la Figura 45.

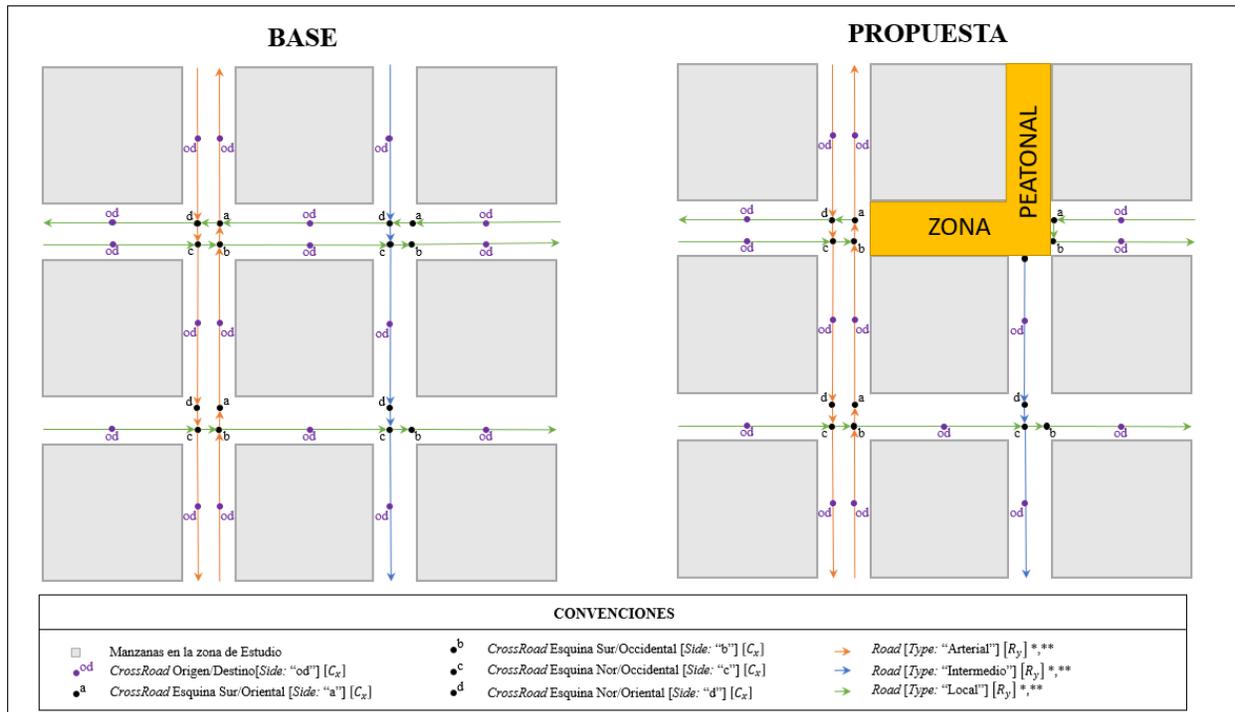


Figura 45. Comparación de cambio de la infraestructura vial para las vías que se sugiere peatonalizar en la propuesta. Base vs Propuesta. Fuente: Elaboración Propia

5.3 Protocolo Experimental

Luego de la definición completa del modelo de simulación se procede a la fase experimental, donde se simulan tanto todas las condiciones y definiciones presentadas en capítulos anteriores; como la propuesta de modificación de lineamientos de uso de vías de la red detallada en el capítulo 4 para evaluar su comportamiento. A continuación, se describe en detalle el proceso de experimentación realizado:

5.3.1 Objetivo:

Demostrar mediante una simulación basada en agentes, que una propuesta específica de modificación de lineamientos de malla vial puede mejorar las condiciones de velocidad de circulación y congestión de la zona de estudio.

5.3.2 Materiales

- Software para simulación:
Netlogo 6.2.2



Figura 46. Netlogo, versión y detalles de sistema. Fuente: (Wilensky, 1999)

Anaconda (Módulos CMD 0.1.1 y Jupyter Notebook 6.4.5, para Phyton)

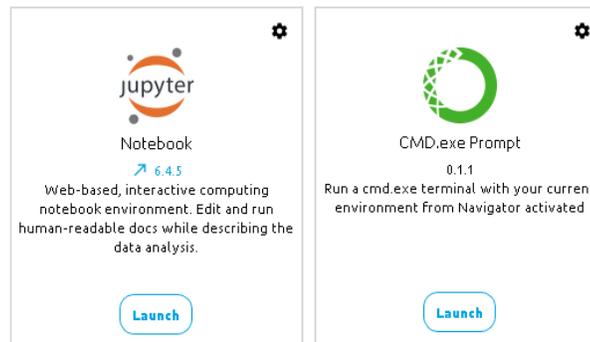


Figura 47. Módulos y versiones CMD y Jupyter Notebook. Fuente: Anaconda Software Distribution. Computer software.



Figura 48. Anaconda Navigator, version y detalle de sistema. Fuente: Anaconda Software Distribution. Computer software

- Máquina para procesamiento de las siguientes características o superior:

Item	Value
OS Name	Microsoft Windows 11 Pro
Version	10.0.22000 Build 22000
Other OS Description	Not Available
OS Manufacturer	Microsoft Corporation
System Name	[REDACTED]
System Manufacturer	Dell Inc.
System Model	XPS 15 9570
System Type	x64-based PC
System SKU	087C
Processor	Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz, 2208 Mhz, 6 Core(s), 12 Logical Processor(s)
BIOS Version/Date	Dell Inc. 1.23.0, 2/12/2021
SMBIOS Version	3.1
Embedded Controller Version	255.255
BIOS Mode	UEFI
BaseBoard Manufacturer	Dell Inc.
BaseBoard Product	02MJVY
BaseBoard Version	A00
Platform Role	Mobile
Secure Boot State	On
PCR7 Configuration	Elevation Required to View
Windows Directory	C:\WINDOWS
System Directory	C:\WINDOWS\system32
Boot Device	\Device\HarddiskVolume1
Locale	United States
Hardware Abstraction Layer	Version = "10.0.22000.1219"
User Name	[REDACTED]
Time Zone	SA Pacific Standard Time
Installed Physical Memory (RAM)	32.0 GB
Total Physical Memory	31.7 GB
Available Physical Memory	21.4 GB
Total Virtual Memory	36.5 GB
Available Virtual Memory	22.9 GB
Page File Space	4.75 GB
Page File	C:\pagefile.sys
Kernel DMA Protection	Off
Virtualization-based security	Not enabled
Device Encryption Support	Elevation Required to View
Hyper-V - VM Monitor Mode E...	Yes
Hyper-V - Second Level Address...	Yes
Hyper-V - Virtualization Enable...	Yes
Hyper-V - Data Execution Prote...	Yes

Figura 49. Detalles de la máquina utilizada para la realización de las simulaciones y procesamiento de todos los datos. Fuente: Extraído de informaciones de sistema de la máquina.

5.3.3 Metodología

El proceso de simulación se ha realizado mediante las fases descritas en la Figura 50 a continuación, donde:

- Los recuadros en negro indican el inicio y fin de la simulación
- Los recuadros en verde señalan los procesos que son ejecutados desde una interfaz de Python en Jupyter Notebook.
- El recuadro rojo muestra cómo desde el proceso en Python se lanza la interfaz de Netlogo para múltiples corridas.

- En cada simulación se ejecuta un recorrido por todos los días de la semana, realizando diez corridas por cada día, con el fin de tener múltiples repeticiones y evaluar una muestra significativa de los datos. Cada simulación procesa un único escenario de malla vial, en el caso de esta investigación se presentan dos simulaciones una con los datos de entrada actuales, y otra con el escenario modificado para evaluación.
- Desde Netlogo se capturan los datos de la encuesta de Movilidad del 2019 con su respectivo tratamiento, descrito en capítulos anteriores y resumido en la Tabla 18.

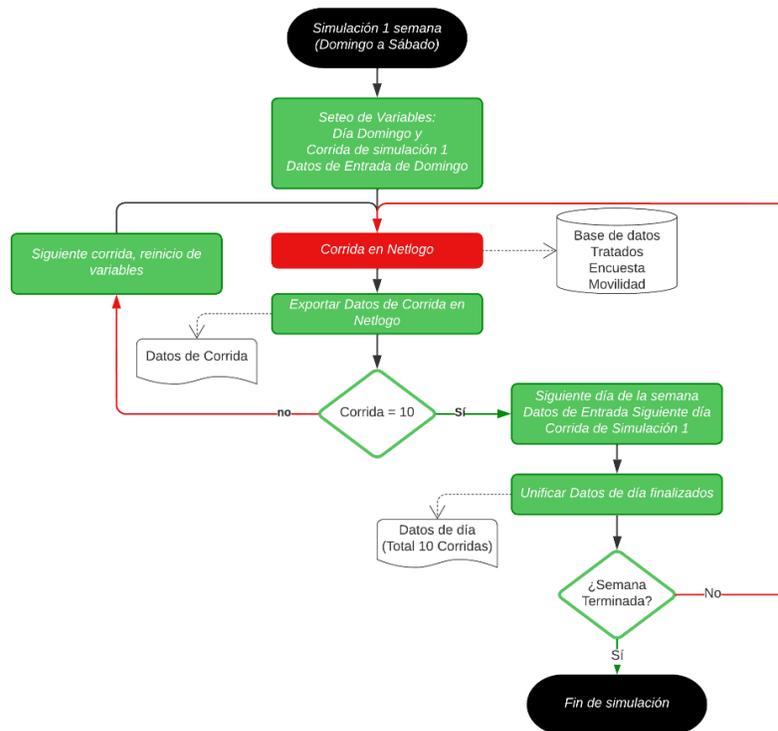


Figura 50. Proceso general de simulación de escenarios (1 semana completa).
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 18. Resumen de datos de Encuesta de movilidad Bogotá 2019 para simulación Netlogo.
Fuente: Elaboración Propia

Entrada	Descripción
Cantidad de carros	Probabilidad poisson de creación de vehículos tipo carro en cada hora del día de simulación, basados en los datos reales de la encuesta de Movilidad de Bogotá 2019
Cantidad de Buses	Probabilidad poisson de creación de vehículos tipo bus en cada hora del día de simulación, basados en los datos reales de la encuesta de Movilidad de Bogotá 2019

Cantidad de Taxis	Probabilidad poisson de creación de vehículos tipo taxi en cada hora del día de simulación, basados en los datos reales de la encuesta de Movilidad de Bogotá 2019
Zonas de Origen	Probabilidad de asignación de un origen específico, basados en los datos reales de la encuesta de Movilidad de Bogotá 2019
Zonas de Destino	Probabilidad de asignación de un destino específico, basados en los datos reales de la encuesta de Movilidad de Bogotá 2019

- Así mismo, desde Netlogo se cargan todos los datos que caracterizar la malla vial a evaluar. Resumidos en la Tabla 19.

Tabla 19. Resumen de datos de malla vial para simulación Netlogo. Fuente: Elaboración Propia

Entrada	Descripción
Características Generales de Vías	Ubicación, tipo (local, arterial, intermedia), velocidad máxima permitida, cantidad de carriles, sentidos de circulación, capacidad de vehículos total.
Información adicional de Vías	Puntos de cruce y conexión con otras vías, carriles dedicados por servicios.
Puntos de Origen y Destino	Identificación de ZAT asignado

- Desde Python se obtienen los datos de salida unificados por cada día de simulación, para poder ser revisados, analizados y comparados.

5.3.4 Escenarios e instancias

A continuación, en la Tabla 20 se detallan los escenario e instancias simuladas.

Tabla 20. Escenarios e instancias simuladas Fuente: Elaboración Propia

Detalle	Escenario Base	Escenario Propuesto
Nombre	Base	Propuesta
Alcance	Malla vial actual (2022) de la zona de estudio; vías, sentidos, capacidades, distribuciones	Independización de las vías dedicadas para rutas de Buses, peatonalización de zona con índices críticos de integración; para las demás vías, mismas condiciones actuales.
Días Simulados	Domingo, Lunes, Martes, Miércoles, Jueves, Viernes, Sábado, Domingo	Domingo, Lunes, Martes, Miércoles, Jueves, Viernes, Sábado, Domingo

Corridas	10 Corridas por cada día de la semana	10 Corridas por cada día de la semana
Datos de Entrada	Encuesta Movilidad 2019	Encuesta Movilidad 2019

5.3.5 Indicadores de eficiencia

Estos indicadores son la medida con la cual se realizará la comparación entre escenarios, pretenden evidenciar si la propuesta presentada realmente es más eficiente que el escenario actual.

Se han definido dos grupos de indicadores, descrito en la Tabla 21; orientados con los tipos de agentes que realizan la simulación, para cada escenario, cada día de la semana:

Tabla 21. Resumen de indicadores de eficiencia a evaluar en cada simulación.
Fuente: Elaboración Propia

Agentes en movimiento Carros, Buses y Taxis	Agentes estáticos Vías
Todos: Velocidad promedio por hora.	Velocidad Promedio por zona por franja horaria
Por tipo de vehículos: Velocidad promedio por hora.	Congestión Promedio por zona por franja horaria

Capítulo 6.

VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

En este capítulo se detallan los resultados de los indicadores de eficiencia descritos en el capítulo anterior para cada uno de los escenarios, así como una comparación de éstos mediante el uso de Anovas y así determinar la relevancia y significancia de las posibles mejoras presentadas.

6.1 Resultados Escenario Base

6.1.1 Agentes en Movimiento

A continuación, se presentan los promedios de velocidad de circulación (km/hr) por cada una de las horas simuladas de cada día de la semana:

DOMINGO:

Se simularon en promedio 90.790 viajes por cada corrida, de los cuales en promedio fueron: 27.920 de carros, 29.796 de Buses y 33.074 de Taxis.

En la Figura 51 pueden observarse detalladamente los promedios de velocidad por hora, dentro de los cuales se evidencia que: la velocidad máxima promedio registrada para este día fue de 43.7km/hora, en la franja entre 5:00 y 6:00 horas; así como la velocidad promedio más baja de 31.5km/hora en la franja de 18:00 a 19:00 horas.

El resto del día se movió en ese intervalo, con zonas muy definidas en comportamiento:

- Horas pico: 11:00 a 13:00 horas y 17:00 a 19:00 horas
- Horas Valle: 9:00 a 11:00 horas y 14:00 a 16:00 horas.
- Horas mejor circulación: 5:00 a 9:00 horas y 21:00 horas en adelante.

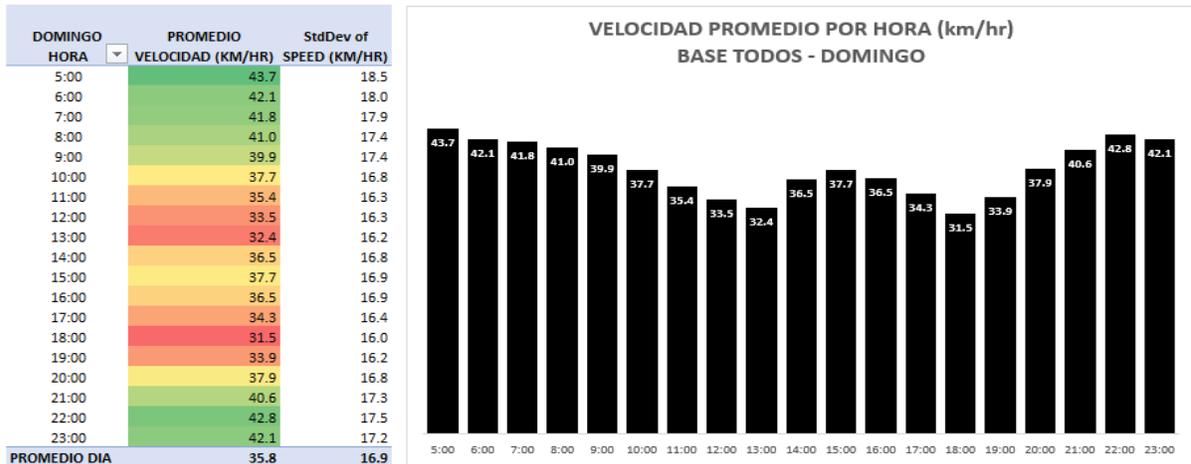


Figura 51. Velocidades promedio de todos los tipos de vehículos, registrados en Domingo, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

A modo de referencia en la Figura 51, así como en las siguientes figuras que muestran el promedio de velocidades de agentes. Se presenta la desviación estándar de los datos simulados, en este caso en cada hora, la desviación presenta entre un 41% y un 51% de variabilidad respecto a los promedios presentados. En la simulación de estos escenarios se corrobora que efectivamente la medida de velocidad de circulación de la zona de estudio es dispersa y esto se da por la diversidad de rutas que pueden evaluarse, la longitud de estas y el tiempo que le toma a cada agente el recorrer la zona en todas las direcciones.

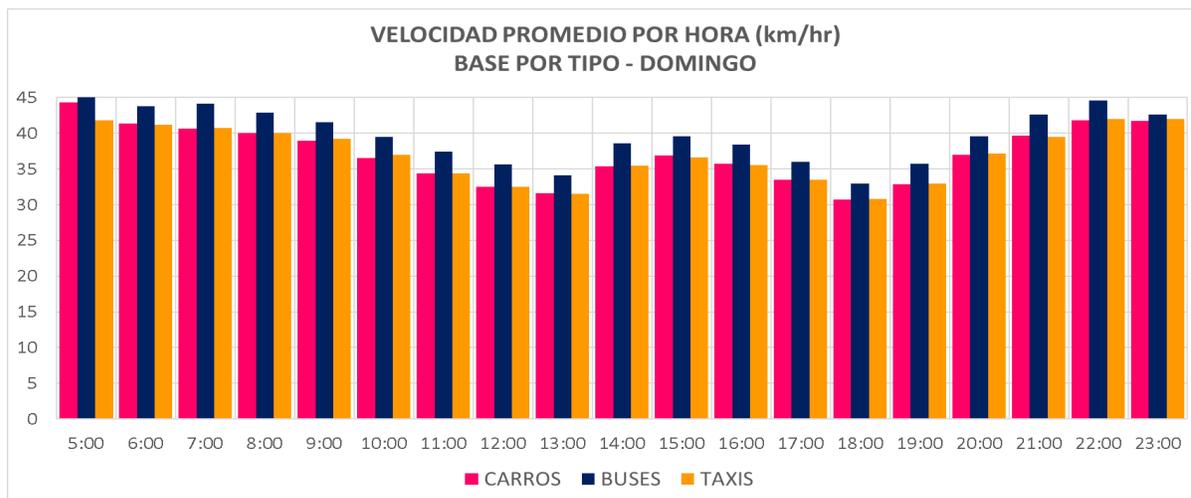


Figura 52. Velocidades promedio por tipos de vehículos, registrados en Domingo, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

Así mismo, pueden verse los promedios por horas de las velocidades, divididas por los tipos de vehículos simulados. En la Figura 52, en magenta los carros, en azul los buses y en naranja los taxis; en el eje y, las velocidades en km/hr.

LUNES:

Se simularon en promedio 162.755 viajes por cada corrida, de los cuales en promedio fueron: 50.069 de carros, 53.467 de Buses y 59.219 de Taxis. En la Figura 53 pueden observarse detalladamente los promedios de velocidad por hora, dentro de los cuales se evidencia que: la velocidad máxima promedio registrada para este día fue de 43.8km/hora, en la franja entre 4:00 y 5:00 horas; así como la velocidad promedio más baja de 16.2km/hora en la franja de 18:00 a 19:00 horas. La desviación estándar de las velocidades presentadas en este caso, para el lunes oscila entre un 40% y un 60%.

El resto del día se movió en ese intervalo, con zonas muy definidas en comportamiento:

- Horas pico: 7:00 a 19:00 horas
- Horas Valle: 6:00 a 7:00 horas y 20:00 a 22:00 horas.
- Horas mejor circulación: antes de las 6:00 horas y de 22:00 horas en adelante.

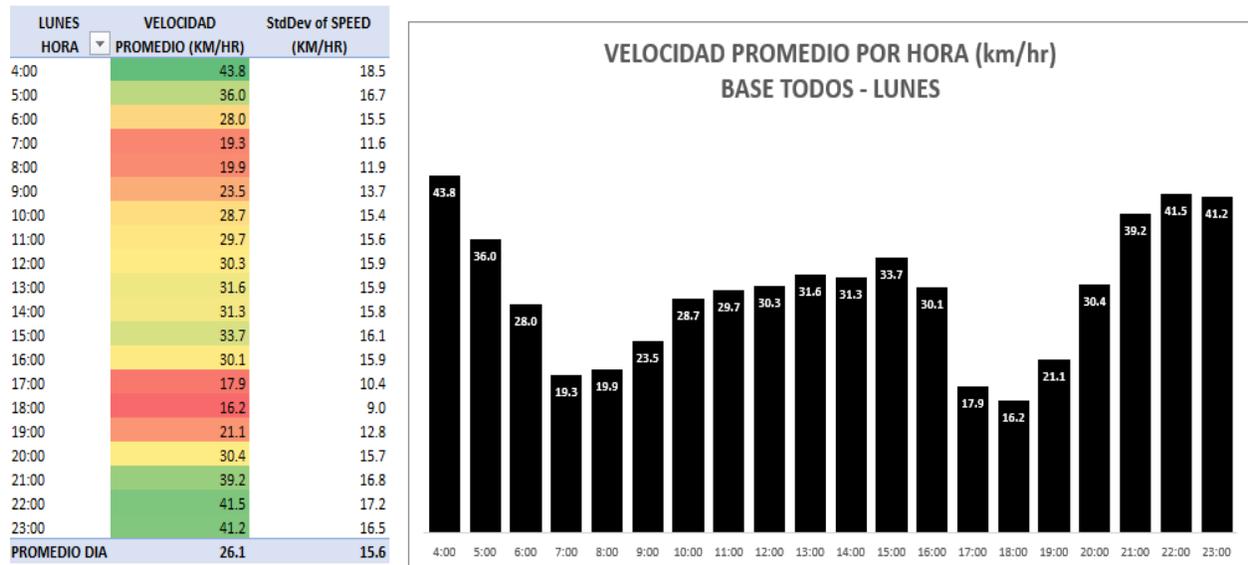


Figura 53. Velocidades promedio de todos los tipos de vehículos, registrados en lunes, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

Así mismo, pueden verse los promedios por horas de las velocidades, divididas por los tipos de vehículos simulados. En la Figura 54, en magenta los carros, en azul los buses y en naranja los taxis; en el eje y, las velocidades en km/hr.

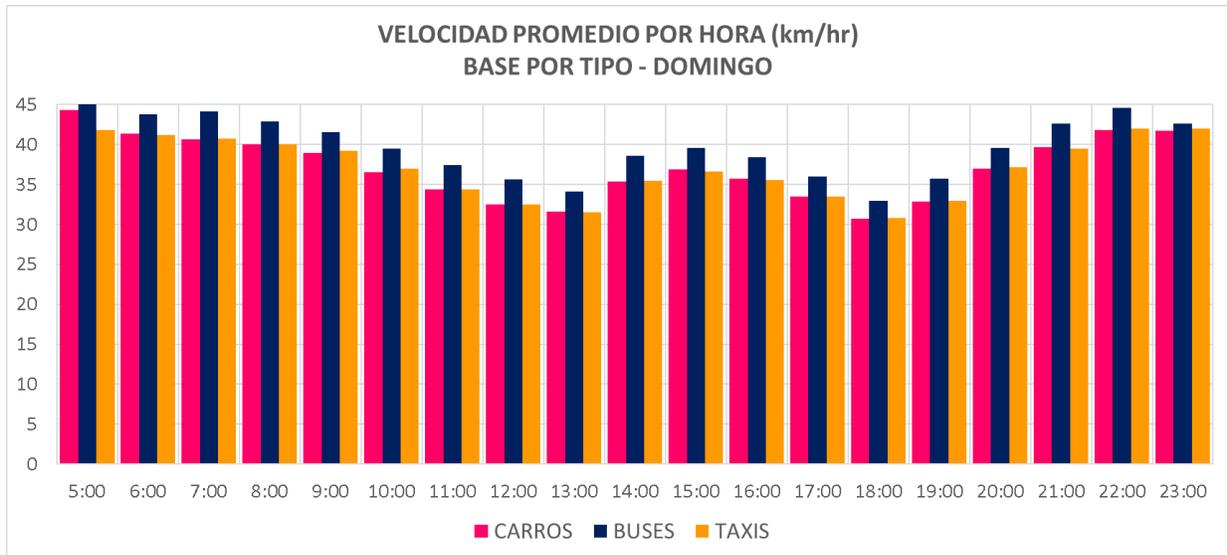


Figura 54. Velocidades promedio por tipos de vehículos, registrado en lunes, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

MARTES, MIÉRCOLES, JUEVES Y SÁBADO:

Se realizó el mismo ejercicio de simulación para cada uno de los días de la semana, el detalle de datos, su tratamiento y resultados obtenidos son similares, Sábado y Domingo, así como Lunes a Jueves. Puede encontrarse todo el detalle en el *Anexo 16. Bases de Datos detalladas con reportes de resultados de todas las simulaciones Base.*

VIERNES:

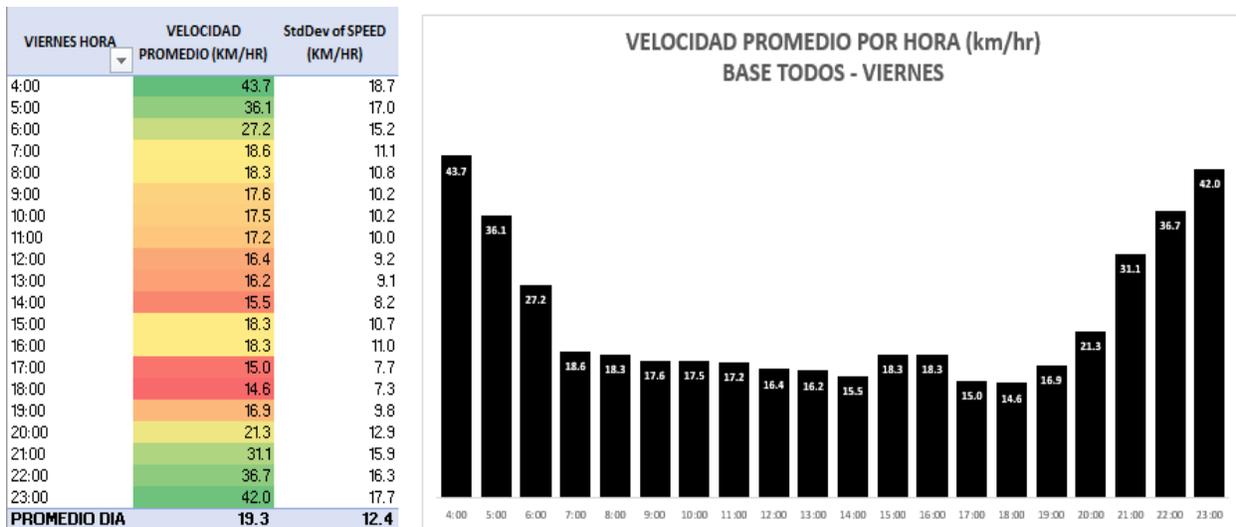


Figura 55. Velocidades promedio de todos los tipos de vehículos, registrados en Viernes, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

Sin embargo, el Viernes presenta los datos de velocidad más bajos de toda la semana, por lo tanto se detallan a continuación los mismos: se simularon en promedio 219.511 viajes por cada corrida, de los cuales en promedio fueron: 67.515 de carros, 72.108 de Buses y 79.888 de Taxis.

En la Figura 55 pueden observarse detalladamente los promedios de velocidad por hora, dentro de los cuales se evidencia que: la velocidad máxima promedio registrada para este día fue de 43.7km/hora, en la franja entre 4:00 y 5:00 horas; así como la velocidad promedio más baja de 14.6km/hora en la franja de 18:00 a 19:00 horas. La desviación estándar de las velocidades presentadas en este caso, para el lunes oscila entre un 42% y un 60%.

El resto del día se movió en ese intervalo, con zonas muy definidas en comportamiento:

- Horas pico: 7:00 a 19:00 horas
- Horas Valle: 6:00 a 7:00 horas y 20:00 a 22:00 horas.
- Horas mejor circulación: antes de las 6:00 horas y de 22:00 horas en adelante.

Así mismo, pueden verse los promedios por horas de las velocidades, divididas por los tipos de vehículos simulados. En la Figura 56, en magenta los carros, en azul los buses y en naranja los taxis; en el eje y, las velocidades en km/hr.

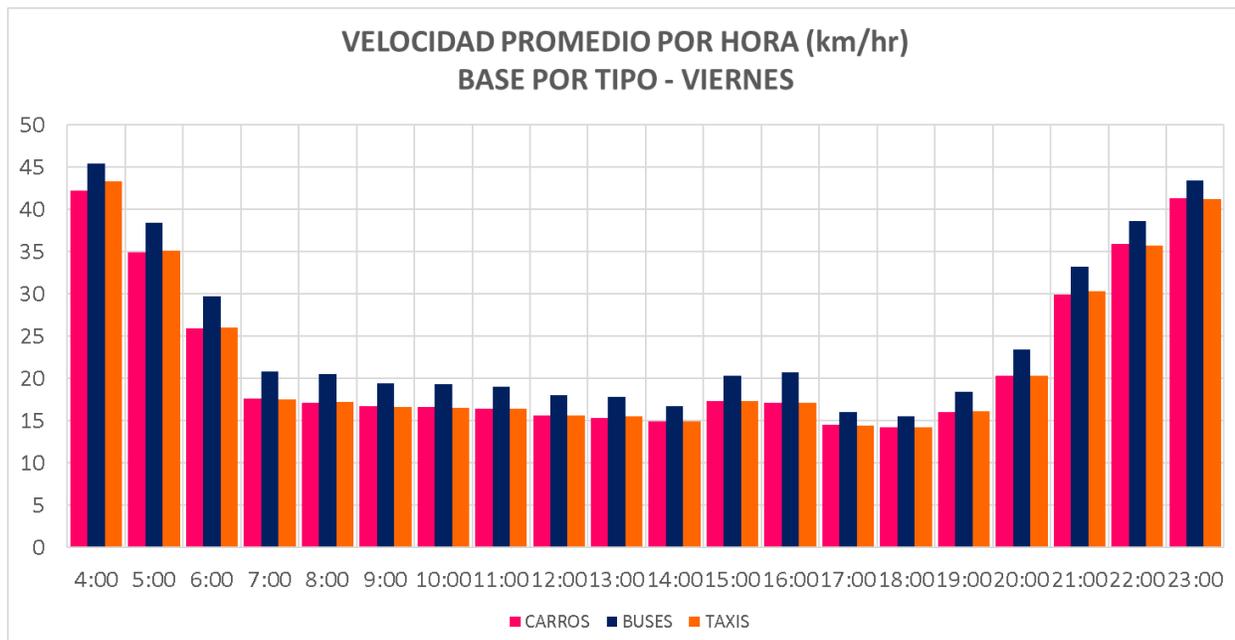


Figura 56. Velocidades promedio por tipos de vehículos, registrados en Domingo, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

CONSOLIDADO SEMANAL:

En resumen, pueden evidenciarse en la Figura 57 las velocidades promedio por hora y por día de la semana; en el costado izquierdo se evidencian las velocidades por debajo de 20km/hr marcadas en rojo; las que están entre 20km/hr y 30km/hora en amarillo y las superiores a 30km/hr en verde y en el costado derecho un resumen de los promedios diarios totales de velocidad por día de la semana.

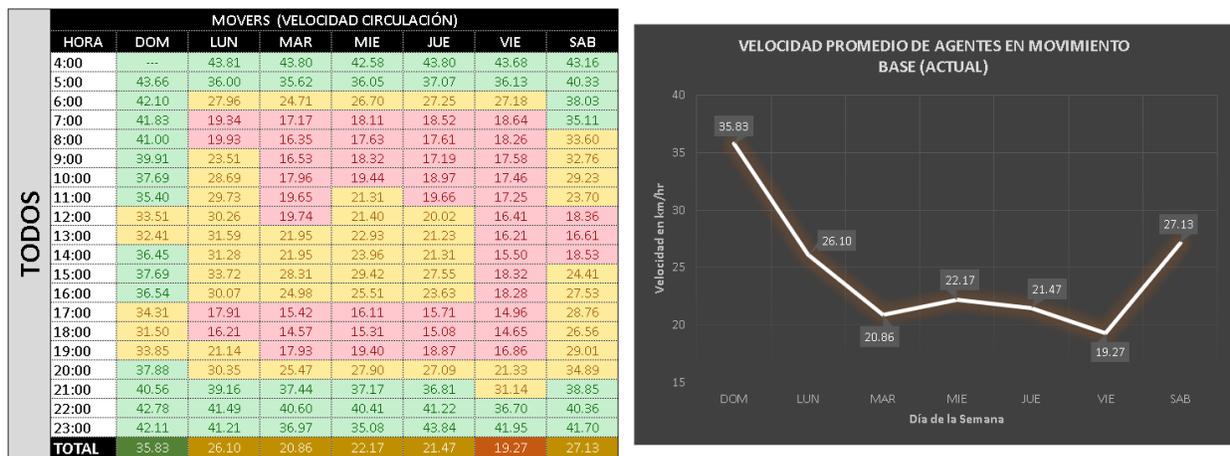


Figura 57. Velocidades promedio para todos los tipos de vehículos, registrados para toda la semana, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

Este resumen permite evidenciar que el día con mejor velocidad de circulación en la zona es el domingo, con una velocidad Promedio de 35.83km/hr; seguido del sábado con una velocidad promedio de circulación de 27.13km/hr. De lunes a viernes, las velocidades se mueven entre 19.27km/hr y 26.1km/hr, siendo los martes y los viernes los días con las condiciones más críticas.

Para continuar con el análisis detallado de los agentes estáticos de la simulación y comprender si la información obtenida por el escenario base es coherente y comparable con la realidad. Se realiza un comparativo gráfico de los datos disponibles para febrero de 2023 en la base de datos de TomTom versus la información obtenida en la simulación base, disponible en la Figura 57. El resultado de este análisis puede evidenciarse en la Figura 58.

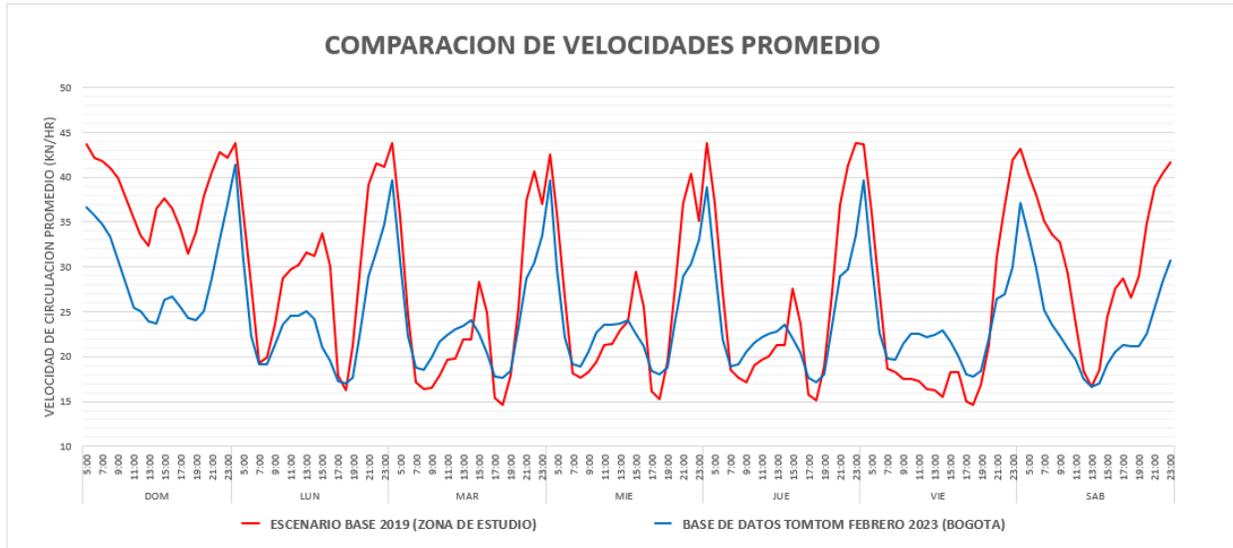


Figura 58. Comparación de velocidades promedio semanales por franjas de hora, en rojo resultados de la simulación Base, en azul información de la base de datos de TomTom. Fuente: Elaboración Propia, con información (TomTom2023, 2023).

Es muy importante resaltar que los datos obtenidos de la base de TomTom corresponden al mes de febrero de 2023, e incluyen la totalidad de la información disponible de la ciudad de Bogotá; mientras que los resultados del escenario base simulado incluyen información histórica de 2019, exclusivamente del área de estudio de la presente investigación. No fue posible obtener los datos de TomTom de la misma fecha, ni de la zona específica. Sin embargo, este comparativo muestra como el comportamiento general del tráfico simulado en la zona de estudio es coherente y corresponde manera general con la realidad actual de la ciudad de Bogotá. Así mismo, permite demostrar que los cambios aplicados sobre este escenario base podrían convertirse en mejoras aplicables a la realidad de la ciudad de Bogotá.

6.1.2 Agentes estáticos

Los agentes estáticos se refieren a las vías (malla vial) sobre la que circulan los agentes en movimiento. Los indicadores seleccionados para evaluar su desempeño son: velocidad promedio y congestión promedio por zona, por franja horaria. En la simulación se tienen más de 4900 vías implementadas, por lo que éstas se han agrupado en 5 zonas como se observa en la Figura 59.

Las zonas se han definido con el fin de agrupar áreas cercanas que tienen usos similares, estas zonas (en naranja en la Figura 55) agrupan a su vez ZATs (Zonas de Asignación de transporte, en recuadros blancos en la Figura 55). En la Tabla 22 se describe esta agrupación realizada.

Tabla 22. Agrupación de vías en Zonas de análisis. Fuente: Elaboración Propia

ZONA	USO PRINCIPAL	ZATs AGRUPADAS
1	Comercial – Residencial	849, 165, 166, 258, 259
2	Comercial	163, 164, 142, 256, 257
3	Comercial	241, 246, 247
4	Comercial – Residencial	245, 847
5	Residencial	243, 260, 261, 262, 263



Figura 59. Segmentación de la zona de estudio por zonas. Fuente: Elaboración Propia

Así mismo, luego de analizar las velocidades promedio por hora en los resultados de los agentes en movimiento, se realizó la segmentación de franjas horarias, de acuerdo con horas de

comportamientos similares que pudieran aplicar a toda la semana, el detalle de esta segmentación se explica en la Tabla 23.

Tabla 23. Agrupación de Franjas Horarias. Fuente: Elaboración Propia

FRANJA HORARIA	HORAS INCLUIDAS
AM	7:00 – 8:00 – 9:00 – 10:00
LUNCH	11:00 – 12:00 – 13:00 – 14:00
PM	17:00 – 18:00 – 19:00 – 20:00
NIGHT	4:00 – 5:00 – 6:00 – 21:00 – 22:00 – 23:00

Adicionalmente, se ha realizado una segmentación adicional de la información, considerando que los Buses (SITP) siguen rutas específicas y en algunos casos tiene vías dedicadas de uso exclusivo, mientras que los carros y taxis no tienen estas condiciones. Por lo tanto se presentan dos grupos adicionales de evaluación: vías donde circulan Buses (SITPs) y vías donde circulan el resto de agentes (Others)

Finalmente, la velocidad promedio se presenta en km/hr. La congestión se presenta en un índice que va de 1 hasta 8, el cual es una variable calculada entre la cantidad de vehículos que se encuentran en cada momento en la vía sobre la capacidad total de esta. En la Figura 60, se puede identificar el rango aplicado:

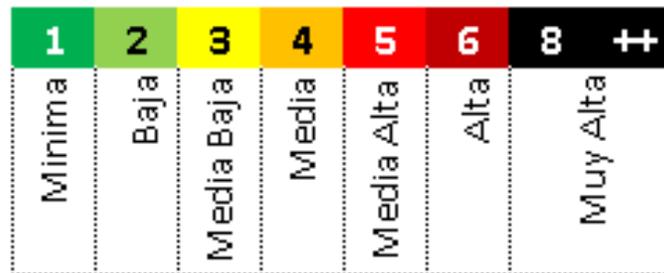


Figura 60. Índice de congestión; rangos y equivalencias. Fuente: Elaboración Propia

Teniendo en cuenta las segmentaciones explicadas de zonas y franjas horarias; a continuación, pueden verse los resultados a los indicadores de velocidad promedio y congestión promedio por zona, por franja horaria, por vehículos de circulación, por día de la semana. Los datos son extraídos para todas las vías de la zona de estudio, en las mismas simulaciones detalladas en los agentes en movimiento.

DOMINGO

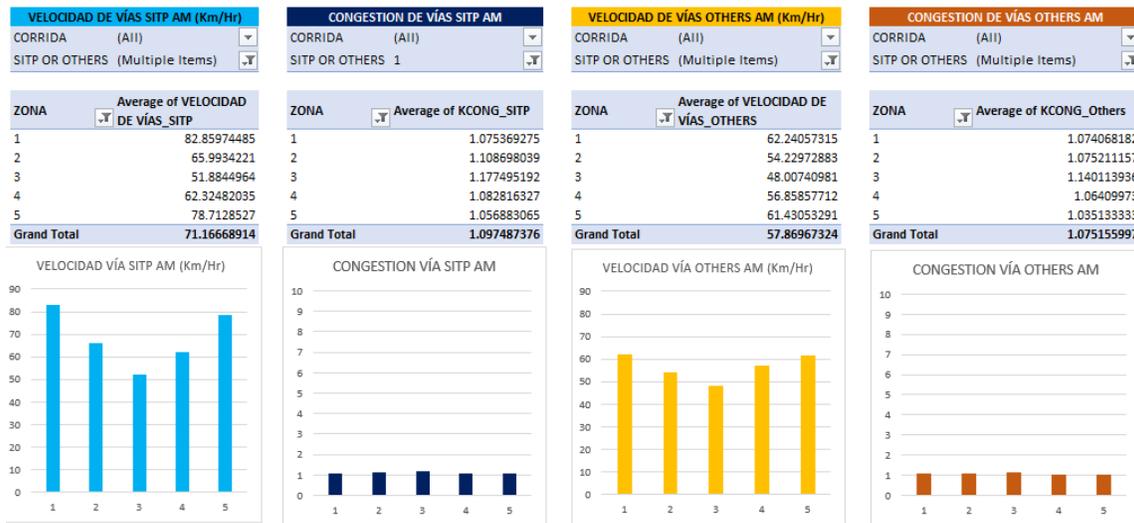


Figura 61. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario AM de Domingo. Fuente: Elaboración Propia
 Para el caso del Domingo en horario AM, como puede verse en la Figura 61, la velocidad promedio más alta de circulación tanto de buses como de Carros y Taxis, se evidencia en la Zona 1 y 5, alrededor de 82km/hr. Así mismo, todas las zonas están en un rango de congestión baja (índice de congestión entre 1 y 2)

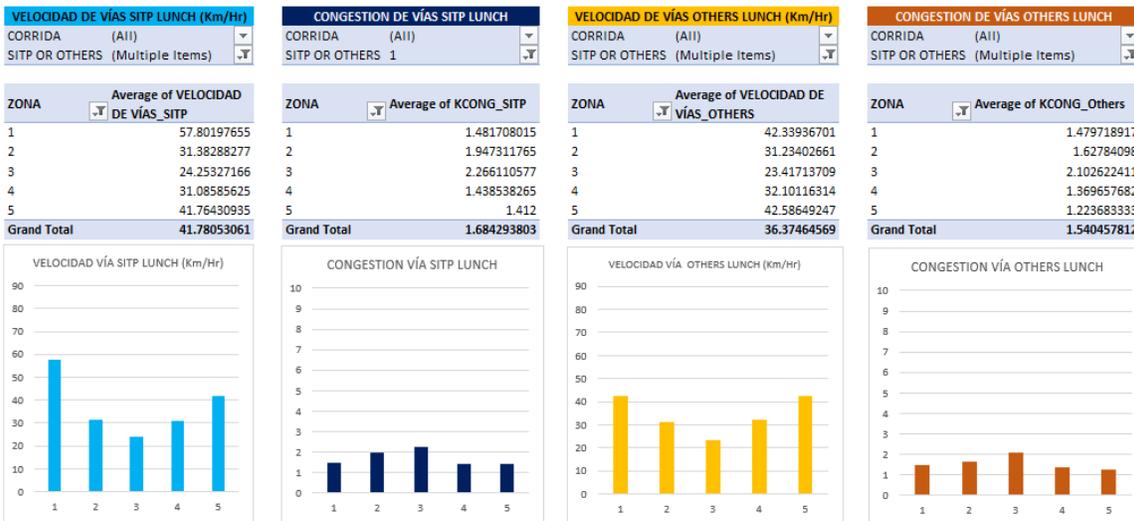


Figura 62. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario LUNCH de Domingo. Fuente: Elaboración Propia

Mientras que en la franja horaria LUNCH, de acuerdo con la Figura 62, solamente la Zona 1 conserva altas velocidades de circulación, mientras que las Zonas 2, 3 y 4 bajan sus promedios

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS DE USOS DE LA MALLA VIAL BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL Y SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES, CHAPINERO, BOGOTÁ.

alrededor de 30 y 40 km/ hora para Buses y Otros tipos de vehículos. Así mismo, los índices de congestión de esta franja horaria van incrementando levemente alrededor de 2.

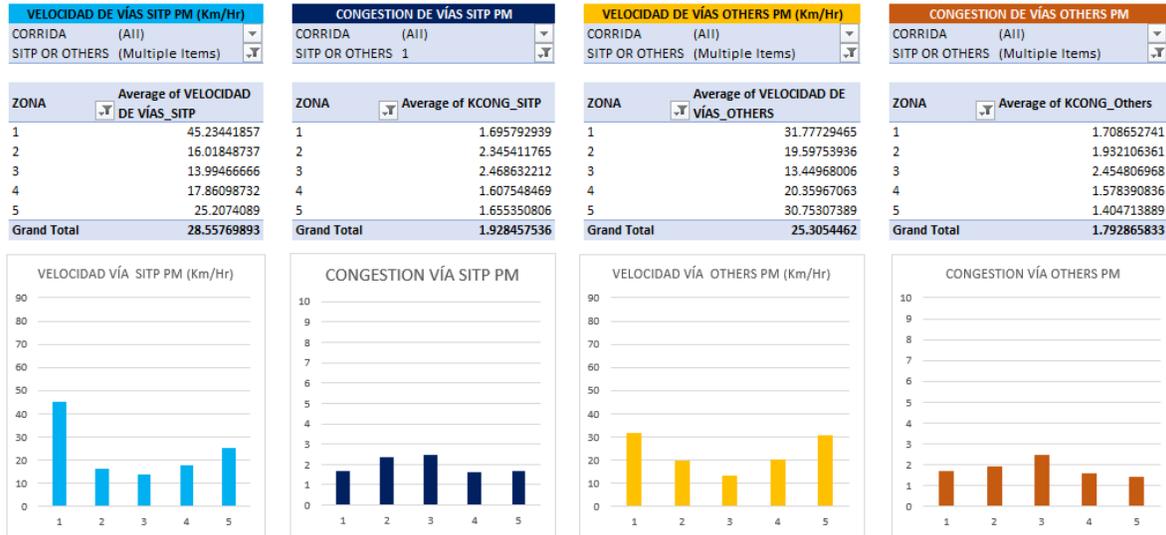


Figura 63. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario PM de Domingo.

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 63 se evidencian cambios más significativos, disminuyendo las velocidades máximas promedio alrededor de 40km/hora e índices de congestión alrededor de 3. En la franja NIGHT las velocidades y congestiones vuelven a sus condiciones más favorables.

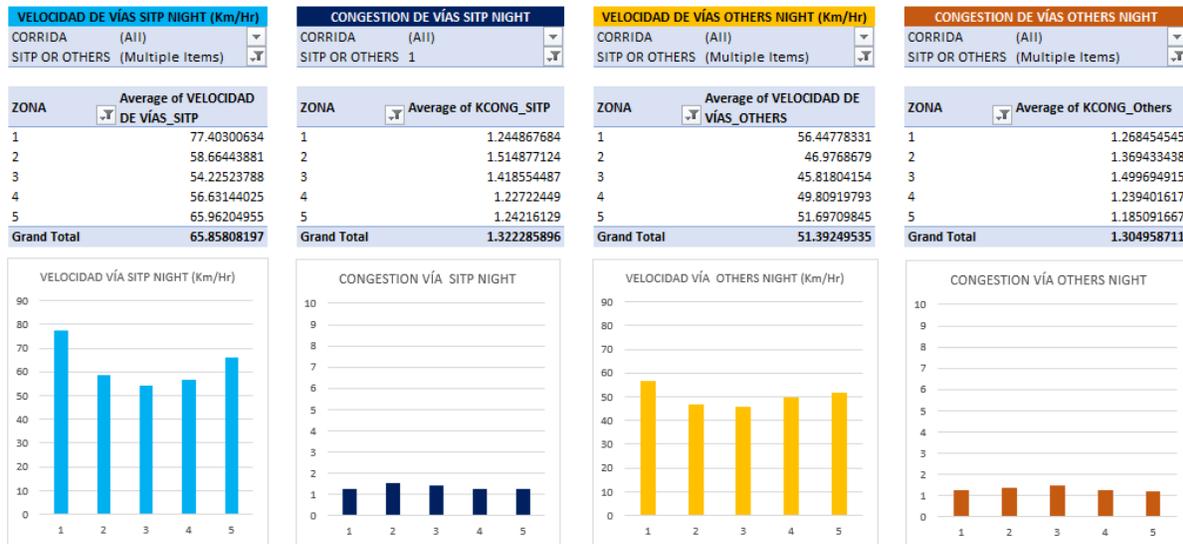


Figura 64. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario NIGHT de Domingo.

Fuente: Elaboración Propia

LUNES

Para el caso del Lunes en horario AM, como puede verse en la Figura 65, la velocidad promedio más alta de circulación de buses fue en la Zona 1 con alrededor de 40km/hr; mientras que de Others

estuvo alrededor de 30km/hr en la misma zona. Así mismo, todas las zonas están en un rango de congestión media y media alta (índice de congestión entre 4 y 5)

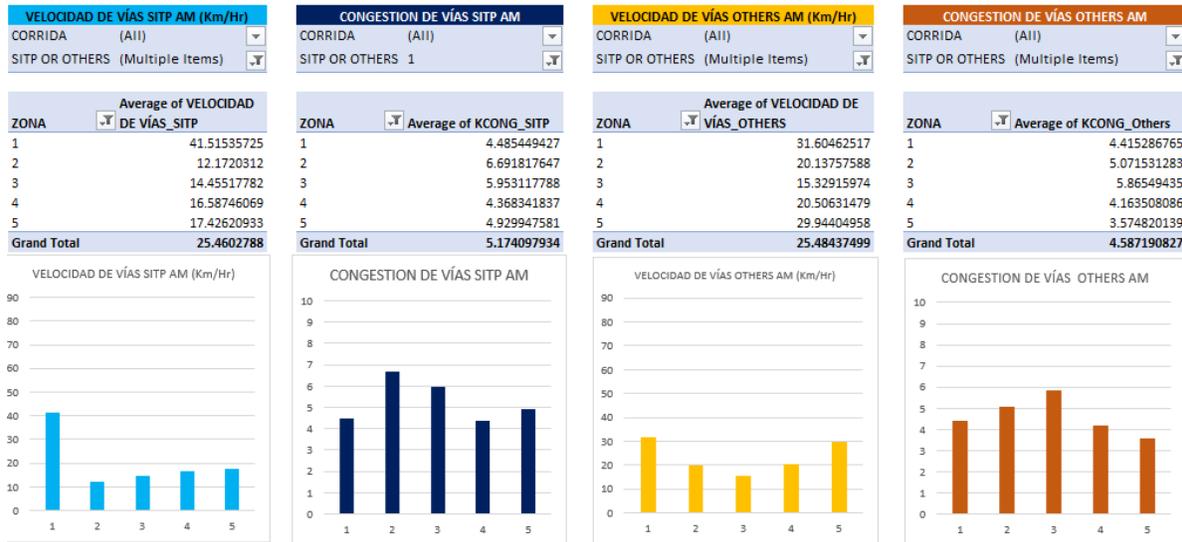


Figura 65. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario AM de lunes.
Fuente: Elaboración Propia

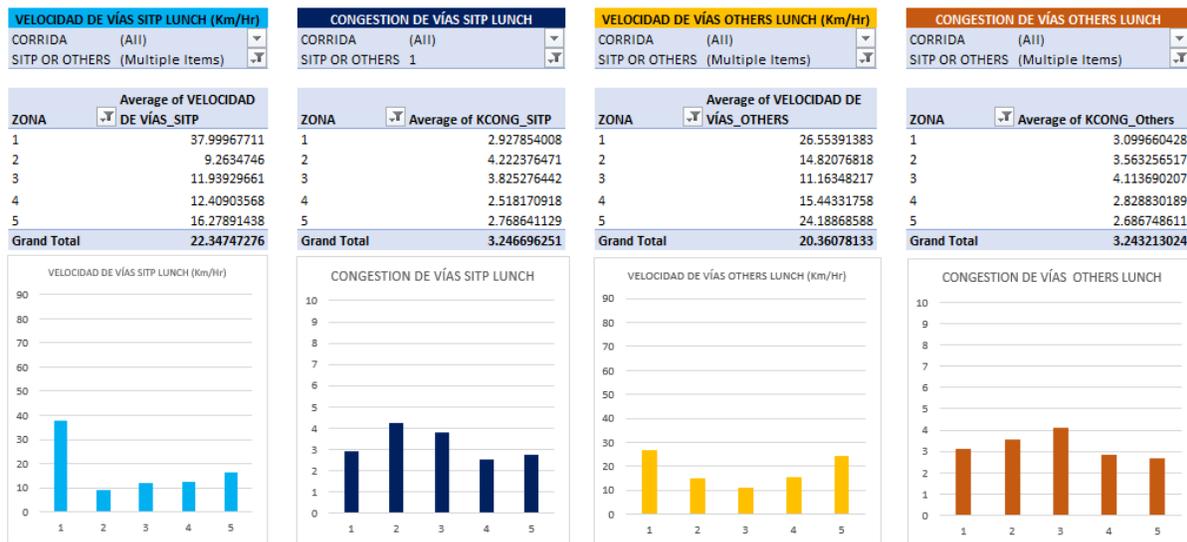


Figura 66. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario LUNCH de lunes.
Fuente: Elaboración Propia

Mientras que en la franja horaria LUNCH, de acuerdo con la Figura 66, solamente la Zona 1 conserva altas velocidades de circulación, mientras que las Zonas 2, 3 y 4 bajan sus promedios alrededor de 10 y 20 km/ hora para Buses y Otros tipos de vehículos. Así mismo, los índices de congestión media de esta franja horaria están alrededor de 3.

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS DE USOS DE LA MALLA VIAL BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL Y SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES, CHAPINERO, BOGOTÁ.

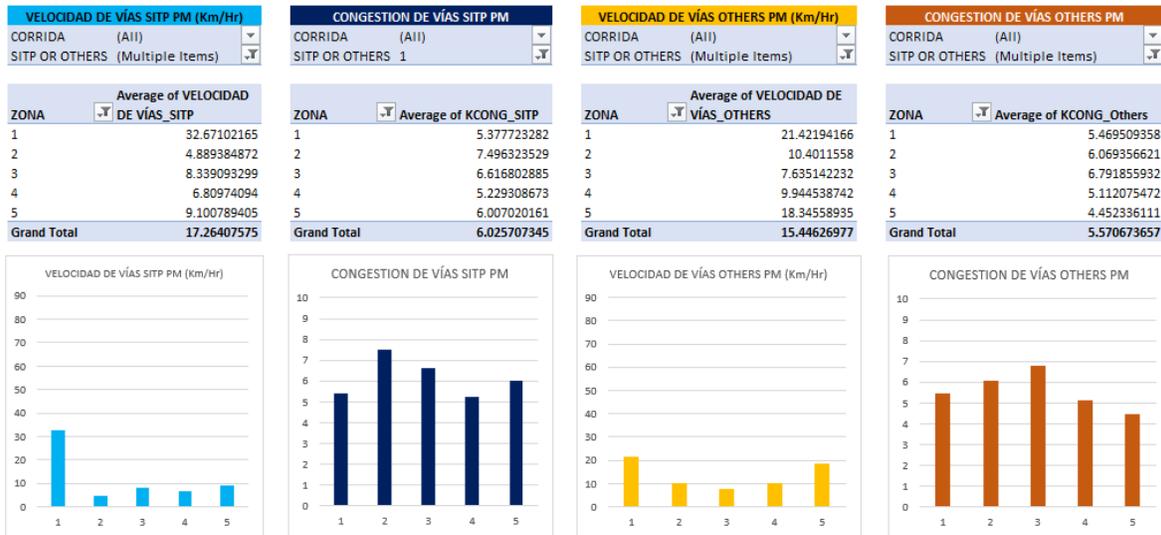


Figura 67. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario PM de lunes.
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 67 se evidencian, velocidades máximas promedio alrededor de 15km/hora e índices de congestión alrededor de altos, alrededor de 6. En la franja NIGHT las velocidades y congestiones vuelven a sus condiciones más favorables.

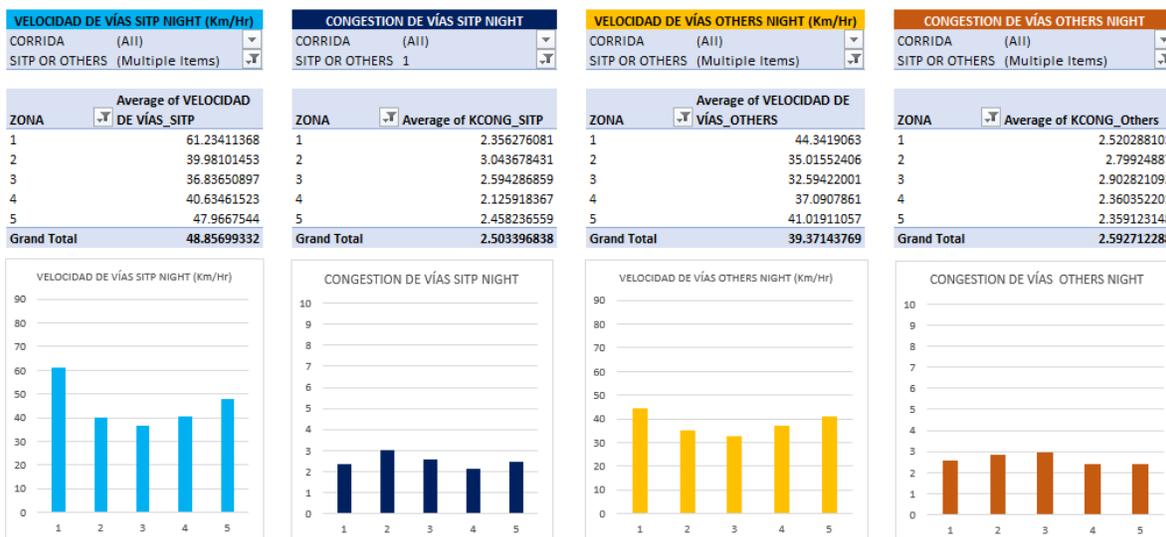


Figura 68. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario NIGHT de lunes.
Fuente: Elaboración Propia

MARTES, MIÉRCOLES, JUEVES Y SÁBADO:

Debido a su similitud, Sabado con Domingo y Lunes a Jueves, no se detallan estos días en el presente documento. Sin embargo, Puede encontrarse todo el detalle en el *Anexo 16. Bases de Datos detalladas con reportes de resultados de todas las simulaciones Base.*

VIERNES:

En el caso de las simulaciones del viernes, se evidencia que las velocidades de circulación promedio en todas las franjas horarias son menores, desde 10km/hr hasta 40km/hr, e índices de congestión muy altos con niveles superiores a 8.

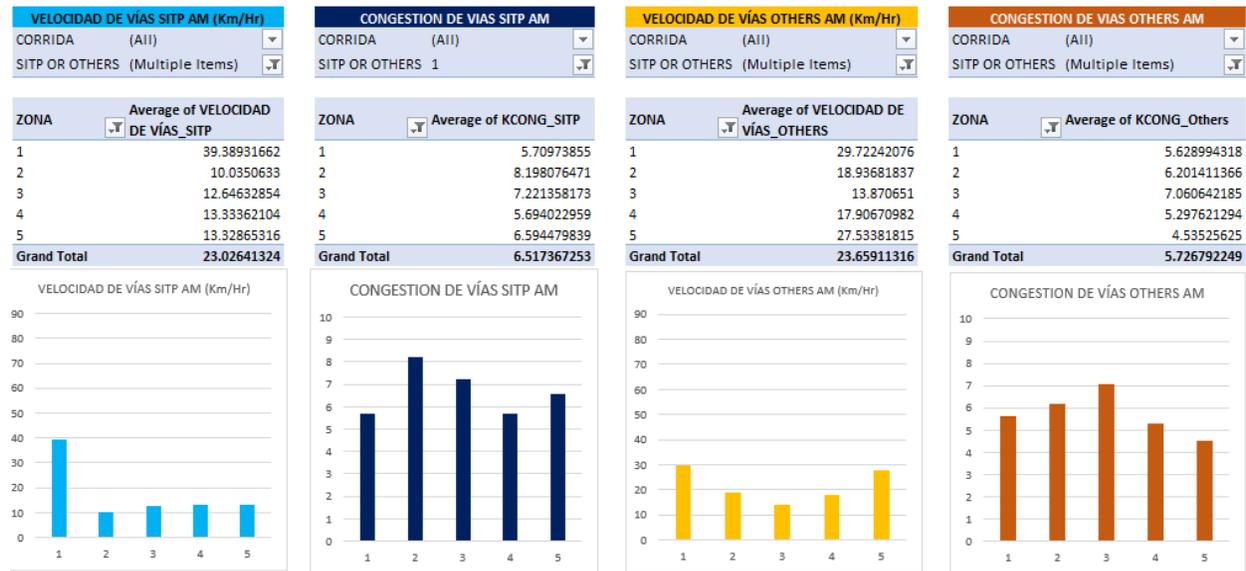


Figura 69. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario AM de viernes.
Fuente: Elaboración Propia

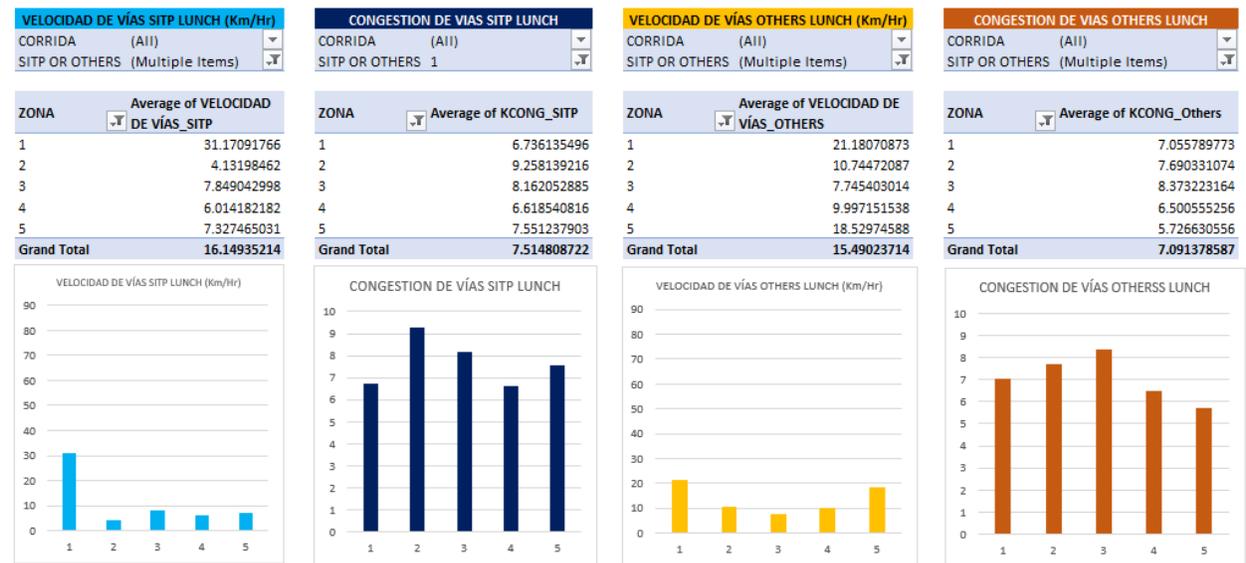


Figura 70. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario LUNCH de viernes.
Fuente: Elaboración Propia

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS DE USOS DE LA MALLA VIAL BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL Y SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES, CHAPINERO, BOGOTÁ.

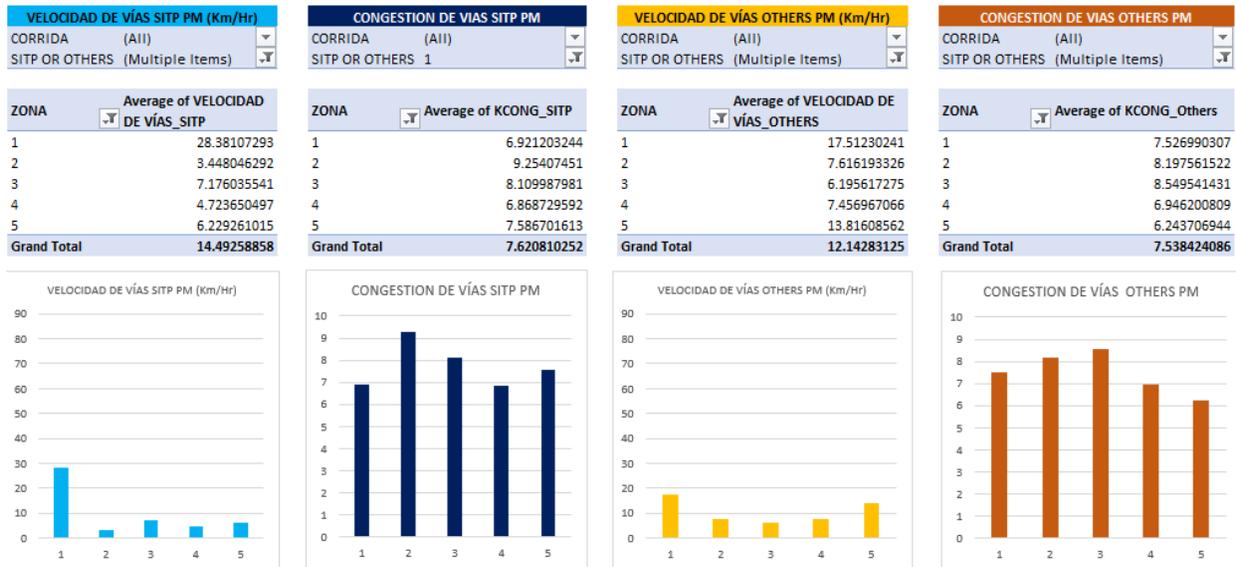


Figura 71. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario PM de viernes.
Fuente: Elaboración Propia

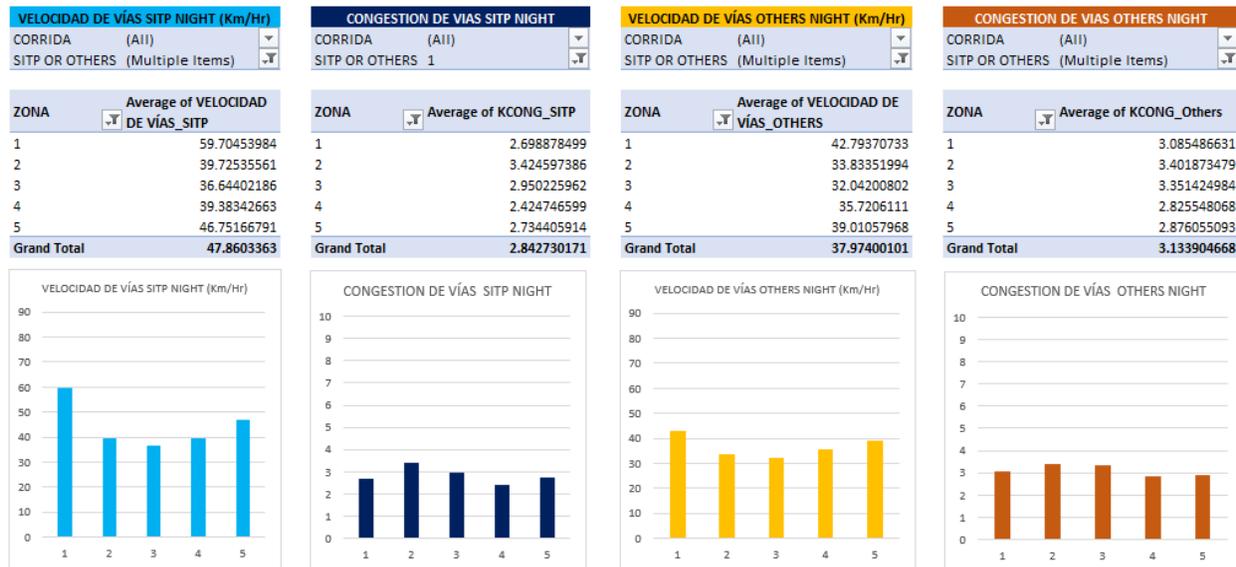


Figura 72. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías, por zona en horario NIGHT de Viernes.
Fuente: Elaboración Propia

CONSOLIDADO SEMANAL:

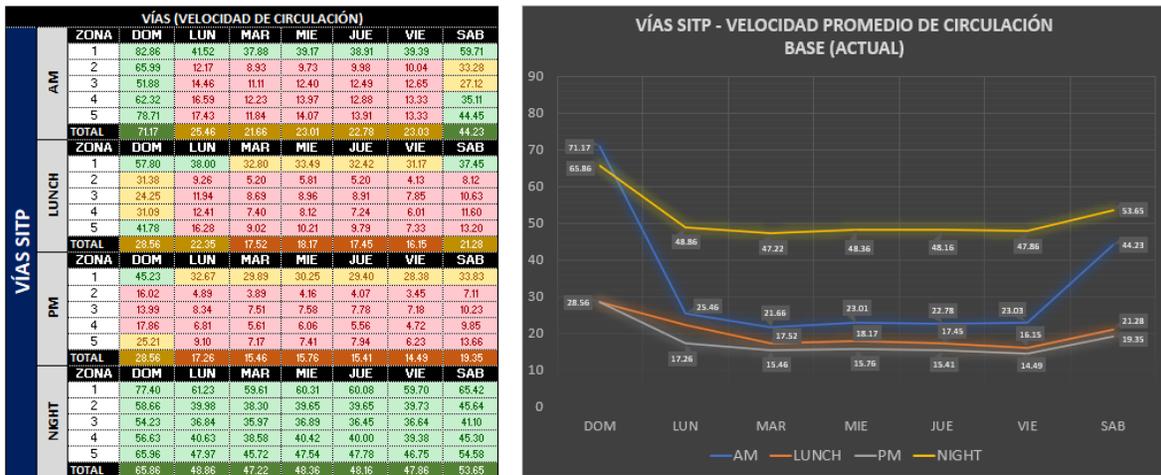


Figura 73. Velocidades promedio percibida en vías con circulación de Buses por zonas, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

En resumen, pueden evidenciarse en la Figura 73 y 74 las velocidades promedio por franja horaria y por día de la semana; en el costado izquierdo se evidencian las velocidades por debajo de 20km/hr marcadas en rojo; las que están entre 20km/hr y 30km/hora en amarillo y las superiores a 30km/hr en verde y en el costado derecho un resumen de los promedios diarios, por zona de velocidad por día de la semana. En la Figura 73 las vías por las que circulan buses, y en la 74 las vías por las que circulan carros y taxis (Others).

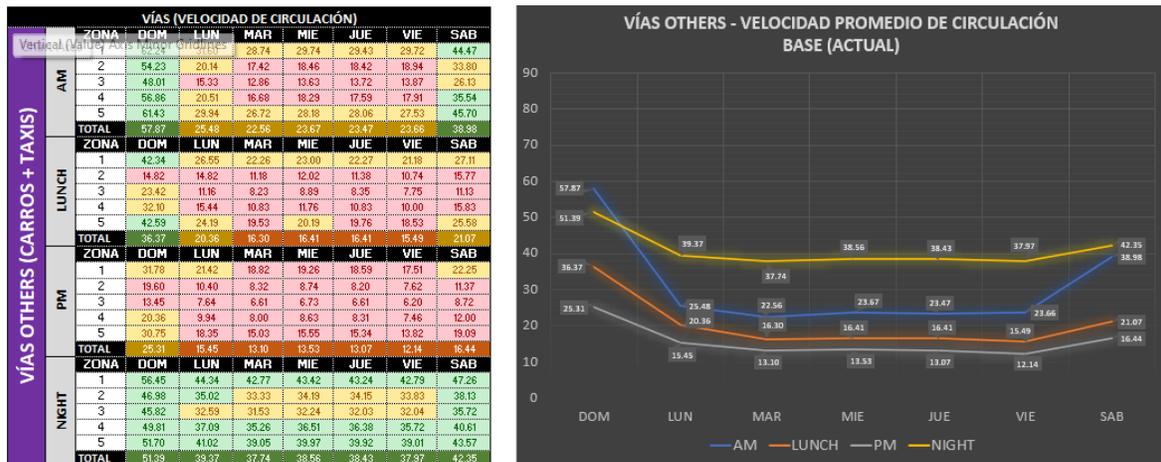


Figura 74. Velocidades promedio percibida en vías con circulación de Others por zonas, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

Estas gráficas permiten evidenciar que el día con mejor velocidad de circulación en la zona es el domingo, con velocidades de vías con buses de hasta 71km/hr en la franja horaria de la mañana; y

velocidades de vías con circulación de Others de hasta 57km/hr. Así como los días con velocidades críticas de 12km/hr y 14km/hr, lunes a viernes en la franja horaria de la tarde, tanto para las vías con buses, como para las vías de Others.

		VÍAS (CONGESTION)							
		ZONA	DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIE	SAB
VÍAS SITP	AM	1	1.08	4.49	6.12	5.64	5.74	5.71	1.63
		2	1.11	6.69	8.61	8.13	8.28	8.20	2.17
		3	1.18	5.95	7.69	7.16	7.33	7.22	2.52
		4	1.08	4.37	6.22	5.61	6.01	5.69	1.55
		5	1.06	4.93	7.02	6.44	6.66	6.59	1.53
	TOTAL	1.10	5.17	6.96	6.44	6.62	6.52	1.86	
	LUNCH	1	1.43	2.93	5.58	5.06	5.61	6.74	5.23
		2	1.95	4.22	7.83	7.21	8.02	9.26	7.85
		3	2.27	3.93	6.81	6.39	6.92	8.16	6.87
		4	2.27	2.82	5.24	4.62	5.51	6.62	5.31
		5	1.44	2.77	5.79	5.29	5.88	7.55	6.04
	TOTAL	1.41	3.25	6.18	5.65	6.30	7.51	6.05	
	PM	1	1.70	5.38	6.33	6.04	6.29	6.92	3.47
		2	2.35	7.90	8.67	8.22	8.64	9.25	4.83
		3	2.47	6.62	7.65	7.25	7.52	8.11	4.31
		4	1.61	5.23	6.35	5.82	6.40	6.87	3.01
5		1.66	6.01	7.04	6.78	6.92	7.59	3.35	
TOTAL	1.92	6.03	7.07	6.69	7.02	7.62	3.79		
NIGHT	1	1.24	2.36	2.72	2.53	2.57	2.70	1.74	
	2	1.51	3.04	3.45	3.17	3.20	3.42	2.17	
	3	1.42	2.59	2.91	2.73	2.73	2.95	1.84	
	4	1.23	2.13	2.46	2.26	2.37	2.42	1.61	
	5	1.24	2.46	2.73	2.58	2.43	2.73	1.74	
TOTAL	1.32	2.60	2.86	2.65	2.68	2.84	1.92		

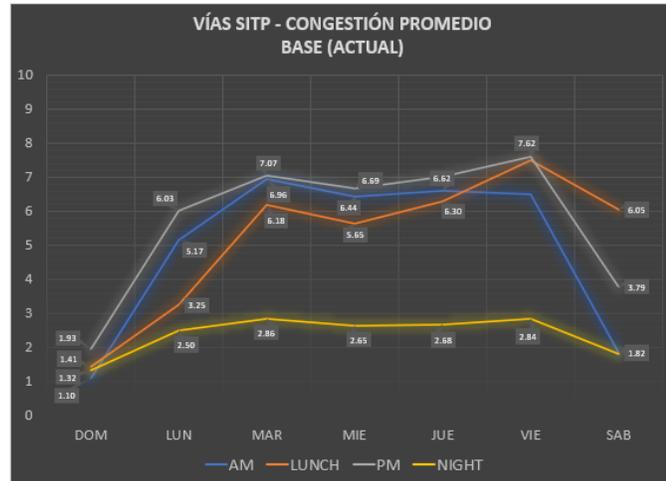


Figura 75. Congestionamientos promedio percibida en vías con circulación de Buses por zonas, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

Así mismo, en las figuras 75 y 76 se resumen los datos de congestión de las vías, por zonas y franjas horarias definidas. De la misma manera, el domingo es el día con los índices de congestión más bajos de la semana, índice con valores alrededor de 1; y el viernes es el día más congestionado con índices cerca al valor 8, en la franja horaria de la tarde para todos los tipos de agentes en movimiento.

		VÍAS (CONGESTION)							
		ZONA	DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIE	SAB
VÍAS OTHERS (CARROS + TAXIS)	AM	1	1.07	4.42	6.05	5.55	5.71	5.63	1.61
		2	1.08	5.07	6.69	6.20	6.39	6.20	1.74
		3	1.14	5.87	7.57	7.04	7.24	7.06	2.33
		4	1.06	4.16	5.85	5.26	5.60	5.30	1.46
		5	1.04	3.57	4.89	4.45	4.60	4.54	1.28
	TOTAL	1.08	4.59	6.18	5.68	5.86	5.73	1.66	
	LUNCH	1	1.48	3.10	5.94	5.35	5.95	7.05	5.14
		2	1.63	3.56	6.60	6.39	6.74	7.69	5.80
		3	2.10	4.11	7.23	6.67	7.30	8.37	6.70
		4	1.37	2.93	5.39	4.79	5.54	6.50	4.99
		5	1.22	2.59	4.76	4.32	4.72	5.73	4.08
	TOTAL	1.54	3.24	6.00	5.44	6.08	7.08	5.29	
	PM	1	1.71	5.47	6.36	6.36	6.74	7.53	3.81
		2	1.93	6.07	7.45	7.01	7.53	8.20	4.32
		3	2.45	6.79	7.96	7.55	7.91	8.55	4.74
		4	1.58	5.11	6.35	5.86	6.40	6.95	3.35
5		1.40	4.45	5.61	5.25	5.55	6.24	3.19	
TOTAL	1.78	5.57	6.85	6.43	6.84	7.54	3.90		
NIGHT	1	1.27	2.52	3.01	2.78	2.86	3.09	1.91	
	2	1.27	2.52	3.01	2.78	2.86	3.09	1.91	
	3	1.50	2.90	3.32	3.08	3.14	3.35	2.12	
	4	1.24	2.36	2.83	2.58	2.70	2.83	1.84	
	5	1.19	2.36	2.79	2.59	2.63	2.88	1.84	
TOTAL	1.30	2.69	3.07	2.84	2.92	3.13	1.97		

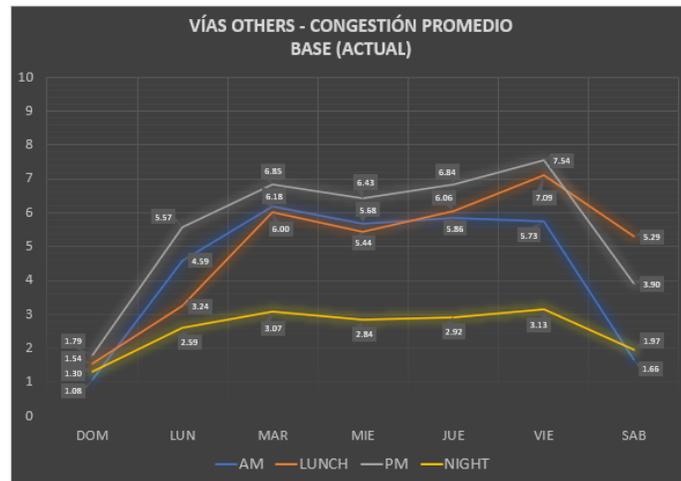


Figura 76. Congestionamientos promedio percibida en vías con circulación de Others por zonas, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

Adicionalmente, todos los detalles de cálculos obtenidos en los resultados de la simulación Base, se encuentran detallados en el Anexo 16.

6.2 Resultados Propuesta

Se realizan múltiples simulaciones (de 10 corridas cada día, cada una) aplicando los criterios definidos en el capítulo de Diseño de Propuesta:

- Usos de vías: exclusividad de servicios, independización por tipos de vías.
- Peatonalización de vías.

Las simulaciones múltiples incluyeron cambiar el uso de vías entre semana, comparado con fines de semana; así como peatonalizar la zona identificada toda la semana o solamente algunos días. El escenario con los resultados más favorables fue:

- Vías con circulación de buses con carril independiente para buses, de lunes a domingo
- Escenario de peatonalización implementado de lunes a viernes.
- Sábado y Domingo sin peatonalizar la zona identificada

A continuación, se detallan los resultados más relevantes del escenario identificado.

6.2.1 Agentes en Movimiento

DOMINGO

En la Figura 77 pueden observarse detalladamente los promedios de velocidad por hora, dentro de los cuales se evidencia que: la velocidad máxima promedio registrada para este día fue de 43.6km/hora, en la franja entre 22:00 y 23:00 horas; así como la velocidad promedio más baja de 34.1km/hora en la franja de 18:00 a 19:00 horas. La desviación estándar en este caso estuvo entre el 41% y el 50%.

El resto del día se movió en ese intervalo, con zonas muy definidas en comportamiento:

- Horas pico: 11:00 a 13:00 horas y 17:00 a 19:00 horas
- Horas Valle: 9:00 a 11:00 horas y 14:00 a 16:00 horas.
- Horas mejor circulación: 5:00 a 9:00 horas y 21:00 horas en adelante.

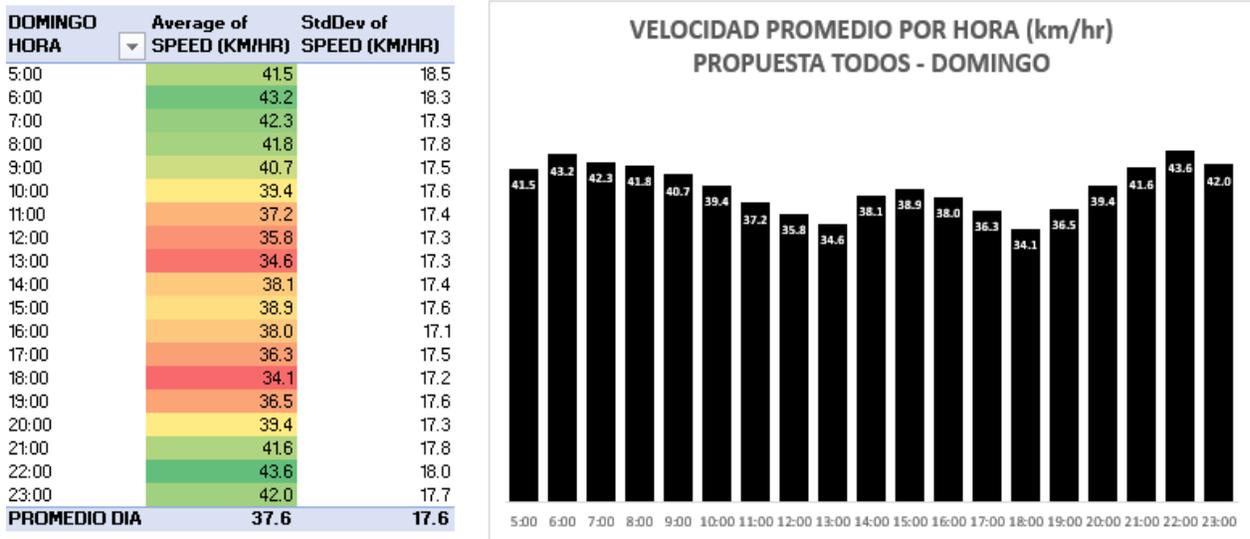


Figura 77. Velocidades promedio de todos los tipos de vehículos en propuesta, registrados en Domingo, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

Así mismo, pueden verse los promedios por horas de las velocidades, divididas por los tipos de vehículos simulados. En la Figura 78, en magenta los carros, en azul los buses y en naranja los taxis; en el eje y, las velocidades en km/hr.

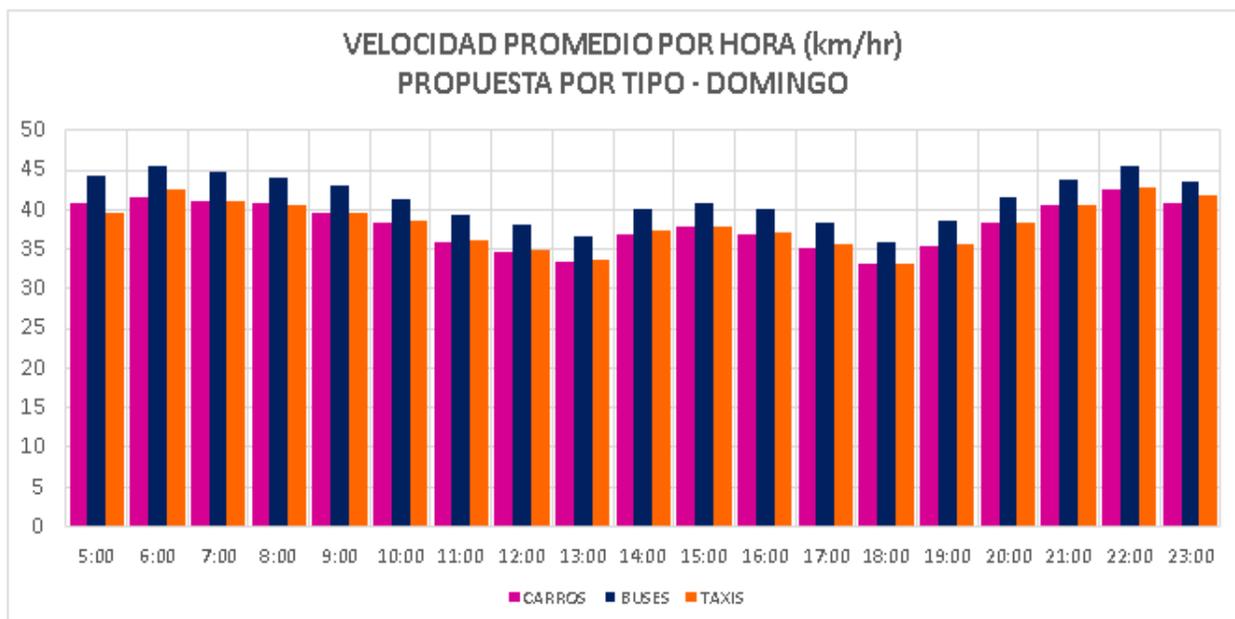


Figura 78. Velocidades promedio por tipos de vehículos en propuesta, registrados en Domingo, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

LUNES

En la Figura 79 pueden observarse detalladamente los promedios de velocidad por hora, dentro de los cuales se evidencia que: la velocidad máxima promedio registrada para este día fue de 45.4km/hora, en la franja entre 23:00 y 24:00 horas; así como la velocidad promedio más baja de 16.8km/hora en la franja de 18:00 a 19:00 horas. La desviación estándar en este caso estuvo entre el 40% y el 66%.

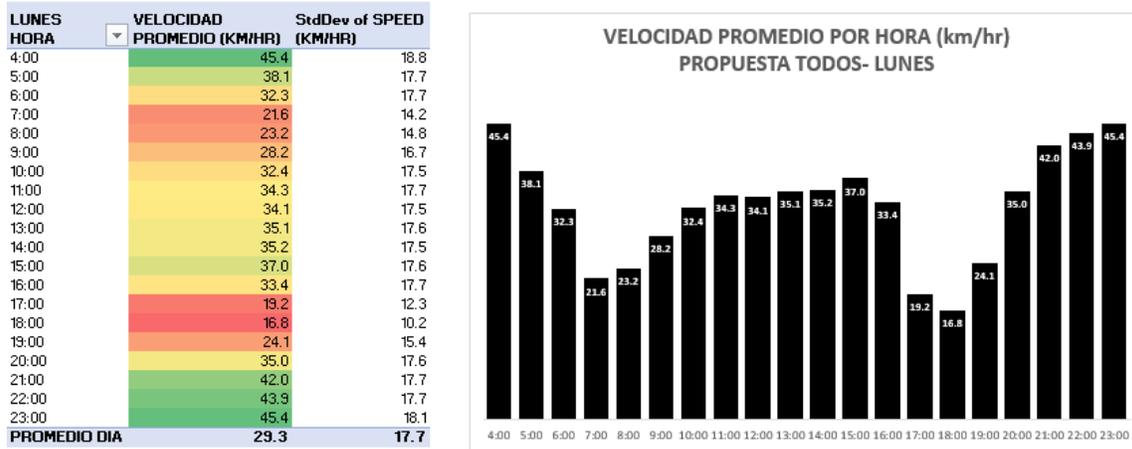


Figura 79. Velocidades promedio de todos los tipos de vehículos en propuesta, registrados en lunes, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

Así mismo, pueden verse los promedios por horas de las velocidades, divididas por los tipos de vehículos simulados. En la Figura 80, en magenta los carros, en azul los buses y en naranja los taxis; en el eje y, las velocidades en km/hr.

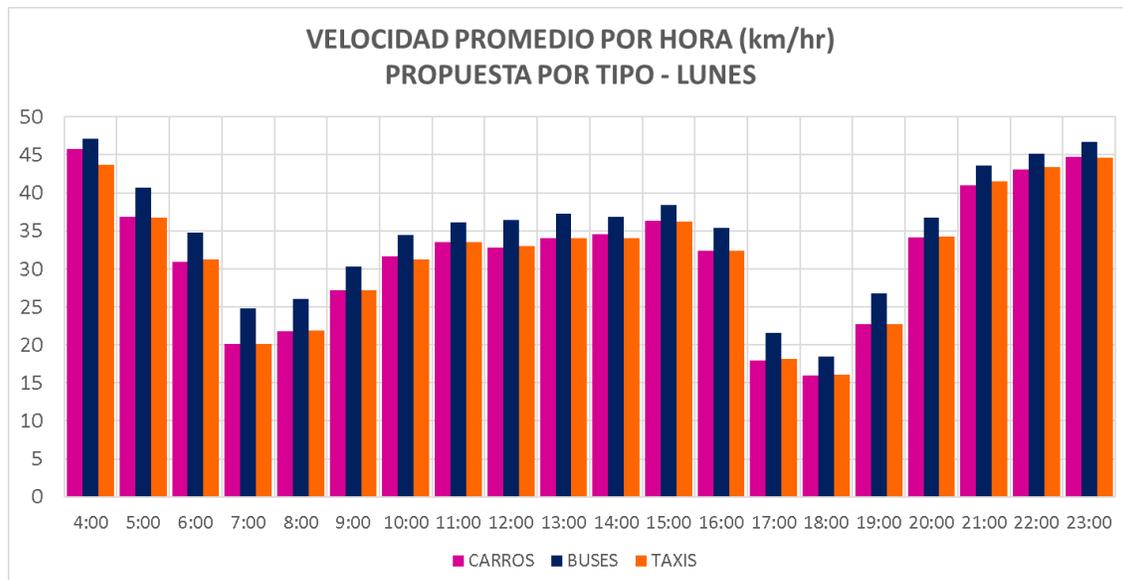


Figura 80. Velocidades promedio por tipos de vehículos en propuesta, registrados en lunes, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

MARTES, MIÉRCOLES, JUEVES Y SÁBADO:

Se realizó el mismo ejercicio de simulación para cada uno de los días de la semana, el detalle de datos, su tratamiento y resultados obtenidos son similares, Sábado y Domingo, así como Lunes a Jueves. Puede encontrarse todo el detalle en el *Anexo 17. Bases de Datos detalladas con reportes de resultados de todas las simulaciones Propuesta.*

VIERNES:

Sin embargo, el viernes presenta los datos de velocidad más bajos de toda la semana, por lo tanto, se detallan a continuación los mismos.

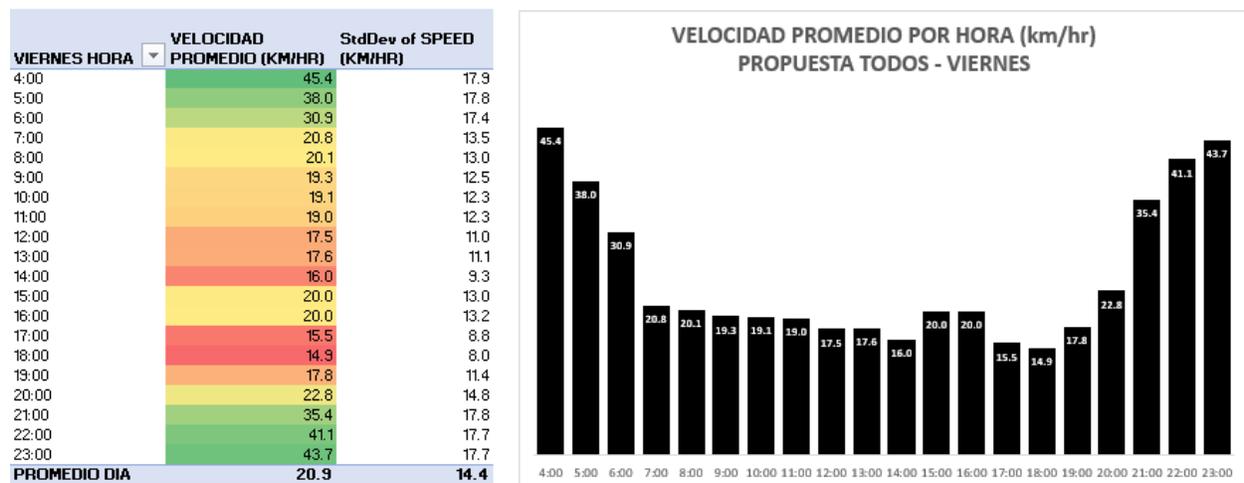


Figura 81. Velocidades promedio de todos los tipos de vehículos en propuesta, registrados en Viernes, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 81 pueden observarse detalladamente los promedios de velocidad por hora, dentro de los cuales se evidencia que: la velocidad máxima promedio registrada para este día fue de 45.4km/hora, en la franja entre 4:00 y 5:00 horas; así como la velocidad promedio más baja de 14.9km/hora en la franja de 18:00 a 19:00 horas. La desviación estándar en este caso estuvo entre el 40% y el 66%.

Así mismo, pueden verse los promedios por horas de las velocidades, divididas por los tipos de vehículos simulados. En la Figura 82, en magenta los carros, en azul los buses y en naranja los taxis; en el eje y, las velocidades en km/hr.

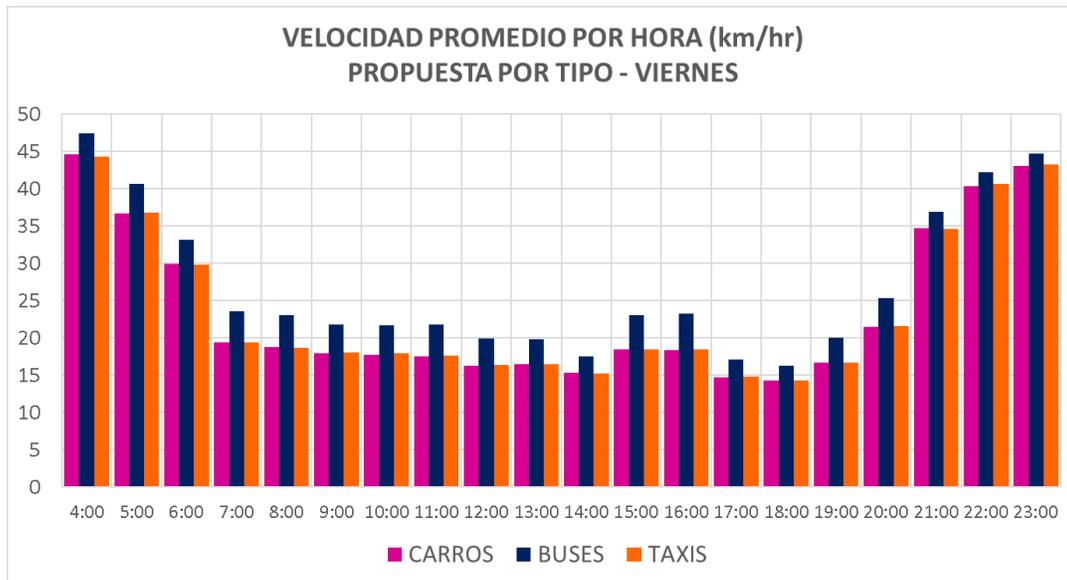


Figura 82. Velocidades promedio por tipos de vehículos en propuesta, registrados en viernes, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

CONSOLIDADO SEMANAL:

En resumen, pueden evidenciarse en la Figura 83 las velocidades promedio por hora y por día de la semana; en el costado izquierdo se evidencian las velocidades por debajo de 20km/hr marcadas en rojo; las que están entre 20km/hr y 30km/hora en amarillo y las superiores a 30km/hr en verde y en el costado derecho un resumen de los promedios diarios totales de velocidad por día de la semana.

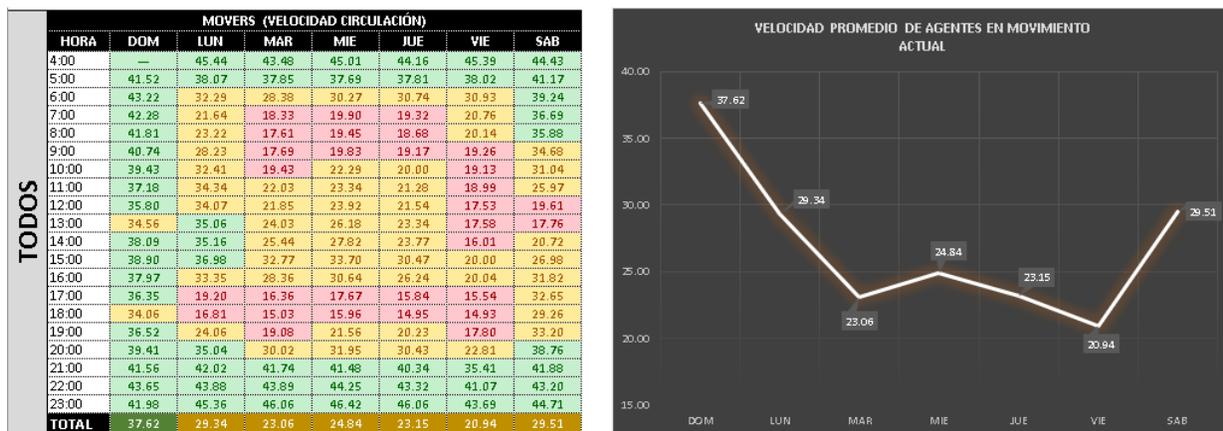


Figura 83. Velocidades promedio por todos los tipos de vehículos, en propuesta, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

Este detalle permite evidenciar que el día con mejor velocidad de circulación en la zona es el domingo, con una velocidad Promedio de 37.62km/hr; seguido del sábado con una velocidad promedio de circulación de 29.51km/hr. De lunes a viernes, las velocidades se mueven entre 20.94km/hr y 29.24km/hr, siendo los martes y los viernes los días con las condiciones más críticas.

6.2.2 Agentes Estáticos

DOMINGO

Para el caso del Domingo en horario AM, como puede verse en la Figura 84, la velocidad promedio más alta de circulación tanto de buses como de Carros y Taxis, se evidencia en la Zona 1 y 5, alrededor de 89km/hr. Así mismo, todas las zonas están en un rango de congestión muy baja (índice de congestión alrededor de 1)

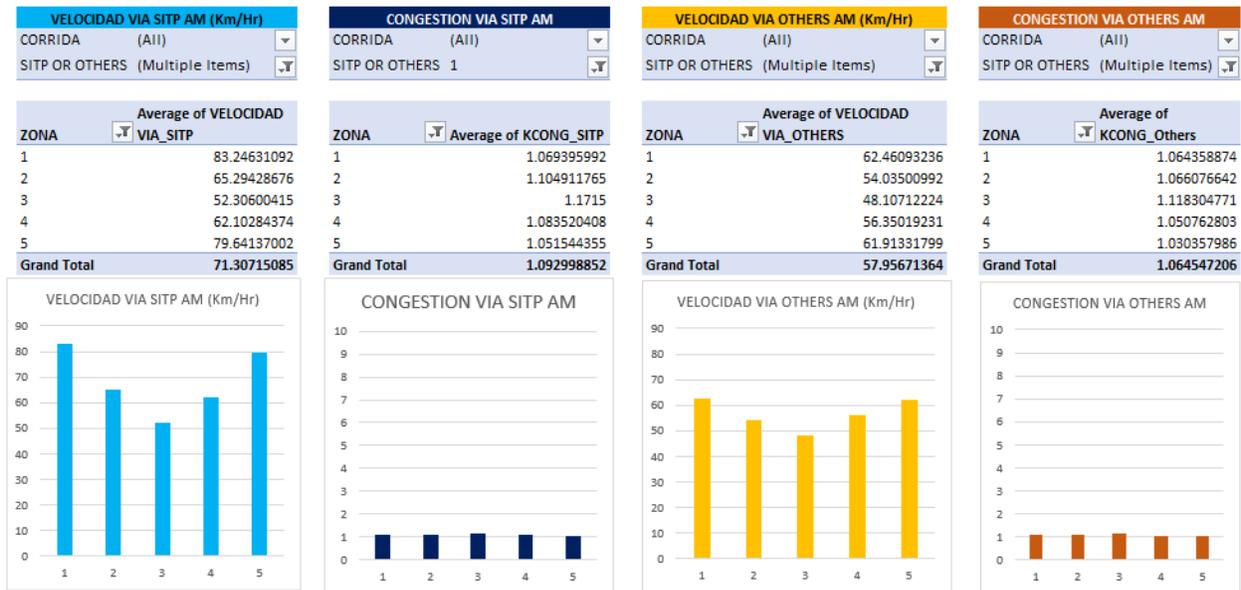


Figura 84. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario AM de Domingo. Fuente: Elaboración Propia

Mientras que en la franja horaria LUNCH, de acuerdo con la Figura 85, solamente la Zona 1 conserva altas velocidades de circulación, mientras que las Zonas 2, 3 y 4 bajan sus promedios alrededor de 30 y 40 km/ hora para Buses y Otros tipos de vehículos. Así mismo, los índices de congestión de esta franja horaria van incrementando levemente alrededor de 1.5.

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS DE USOS DE LA MALLA VIAL BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL Y SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES, CHAPINERO, BOGOTÁ.

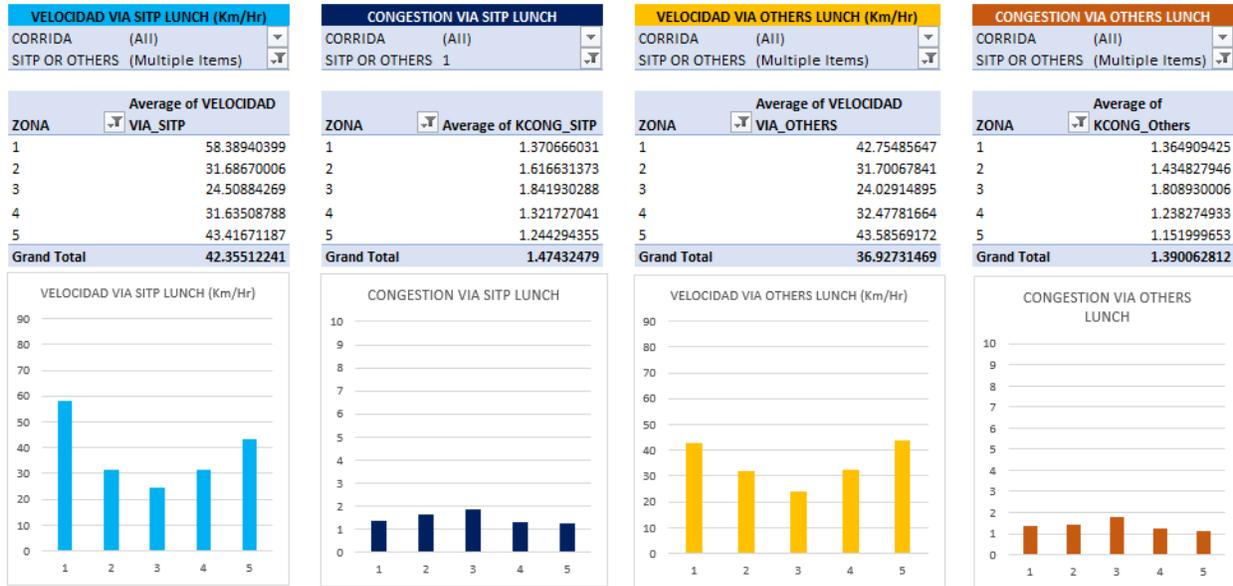


Figura 85. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario LUNCH de Domingo. Fuente: Elaboración Propia

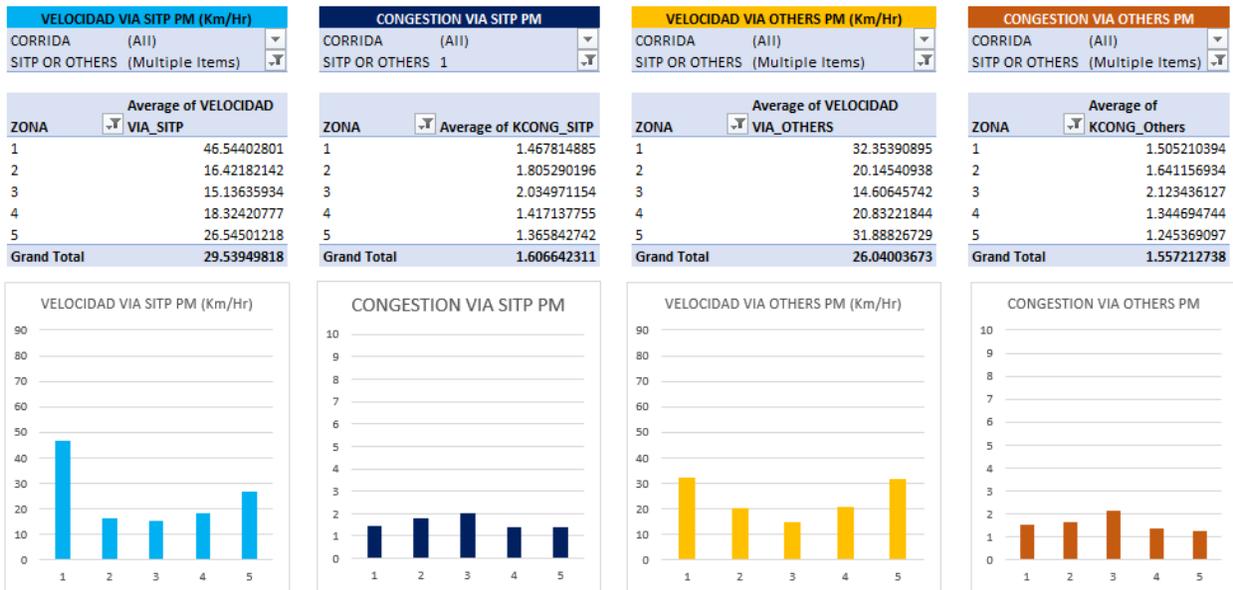


Figura 86. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario PM de Domingo. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 86 se evidencian cambios más significativos, disminuyendo las velocidades máximas promedio alrededor de 40km/hora e índices de congestión alrededor de 1.5. En la franja NIGHT las velocidades y congestiones vuelven a sus condiciones más favorables.

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS DE USOS DE LA MALLA VIAL BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL Y SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES, CHAPINERO, BOGOTÁ.



Figura 87. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario NIGHT de Domingo. Fuente: Elaboración Propia

LUNES

Para el caso del Lunes en horario AM, como puede verse en la Figura 88, la velocidad promedio más alta de circulación de buses fue en la Zona 1 con alrededor de 44km/hr; mientras que de Others estuvo alrededor de 33km/hr en la misma zona. Así mismo, todas las zonas están en un rango de congestión media baja (índice de congestión alrededor de 3)

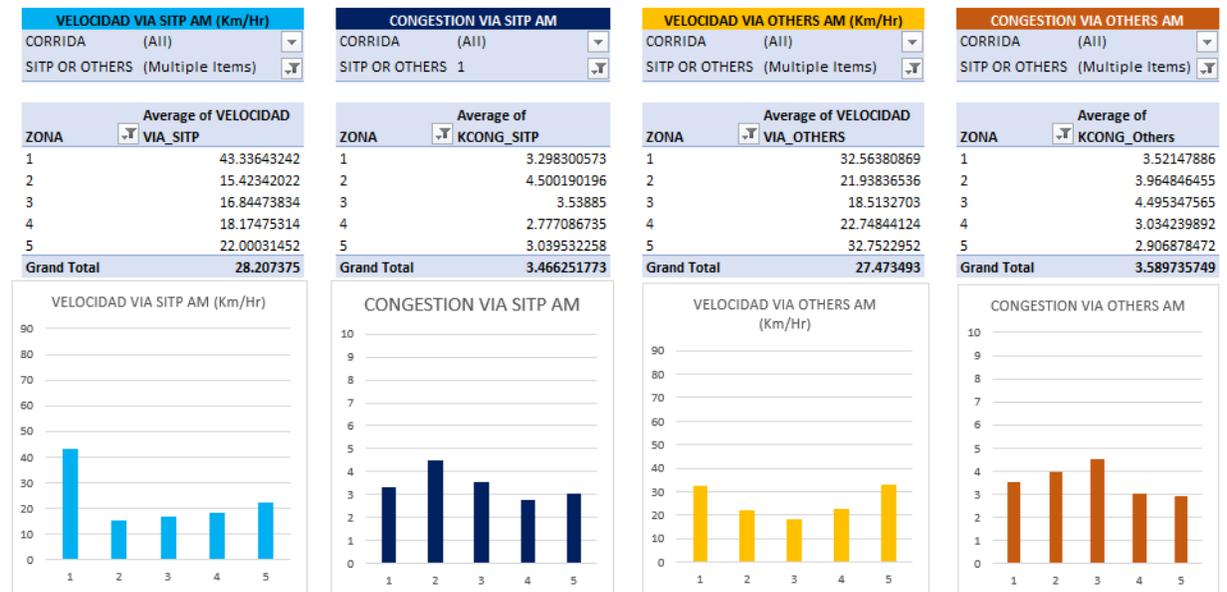


Figura 88. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario AM de lunes. Fuente: Elaboración Propia

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS DE USOS DE LA MALLA VIAL BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL Y SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES, CHAPINERO, BOGOTÁ.

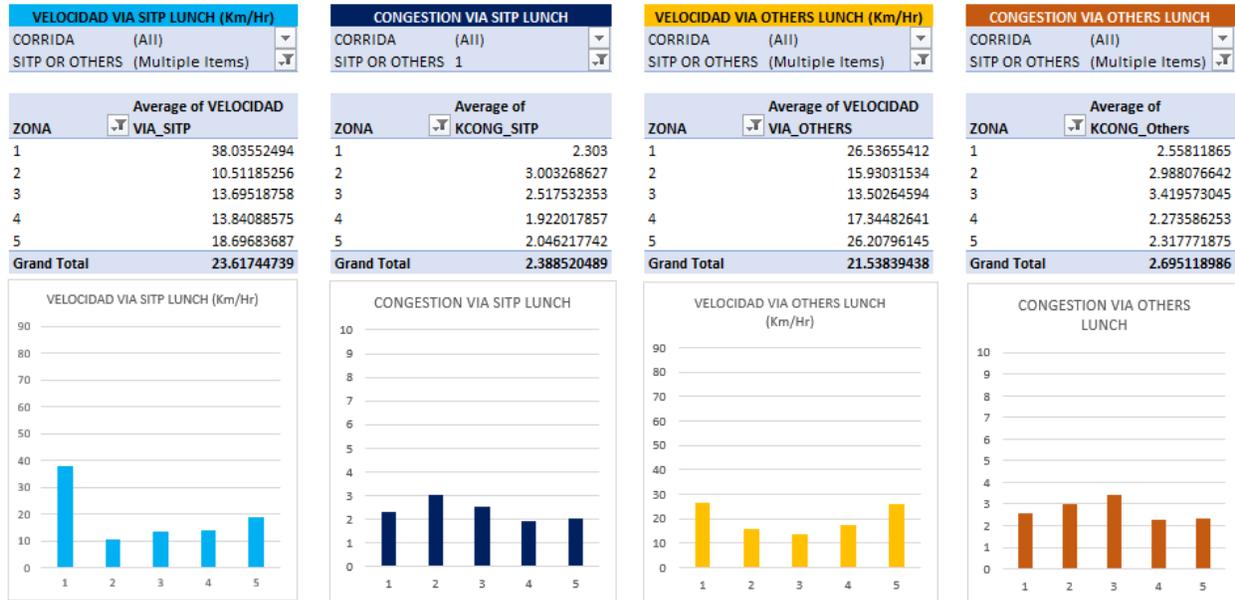


Figura 89. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario LUNCH de lunes. Fuente: Elaboración Propia

Mientras que en la franja horaria LUNCH, de acuerdo con la Figura 89, solamente la Zona 1 conserva altas velocidades de circulación, mientras que las Zonas 2, 3 y 4 bajan sus promedios alrededor de 15k/h y 20 km/ hora para Buses y Otros tipos de vehículos. Así mismo, los índices de congestión media de esta franja horaria están alrededor de 2.



Figura 90. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario PM de lunes. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 90 se evidencian, velocidades máximas promedio alrededor de 17km/hora e índices de congestión medio-altos, alrededor de 5. En la franja NIGHT las velocidades y congestiones vuelven a sus condiciones más favorables.

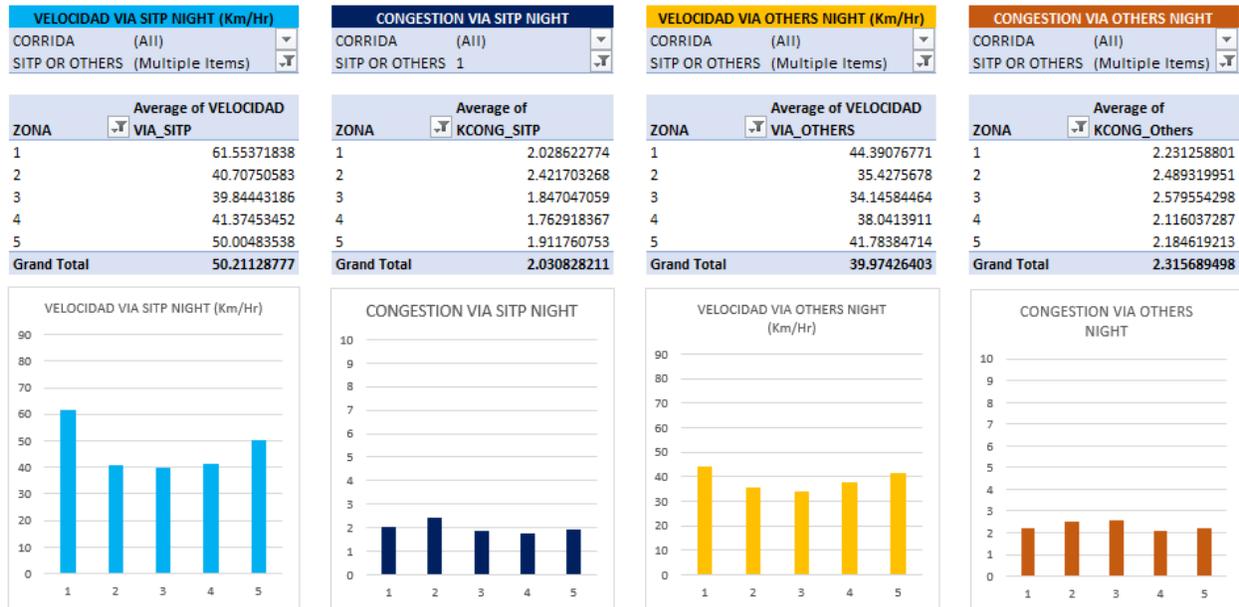


Figura 91. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario NIGHT de lunes. Fuente: Elaboración Propia

MARTES, MIÉRCOLES, JUEVES Y SÁBADO:

Debido a su similitud, Sábado con Domingo y Lunes a Jueves, no se detallan estos días en el presente documento. Sin embargo, Puede encontrarse todo el detalle en el *Anexo 17. Bases de Datos detalladas con reportes de resultados de todas las simulaciones Propuesta.*

VIERNES:

En el caso de las simulaciones del viernes, se evidencia que las velocidades de circulación promedio en todas las franjas horarias son menores, desde 10km/hr hasta 40km/hr, e índices de congestión que siguen siendo altos, pero mejores que en el escenario Base, alrededor de 6.

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS DE USOS DE LA MALLA VIAL BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL Y SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES, CHAPINERO, BOGOTÁ.

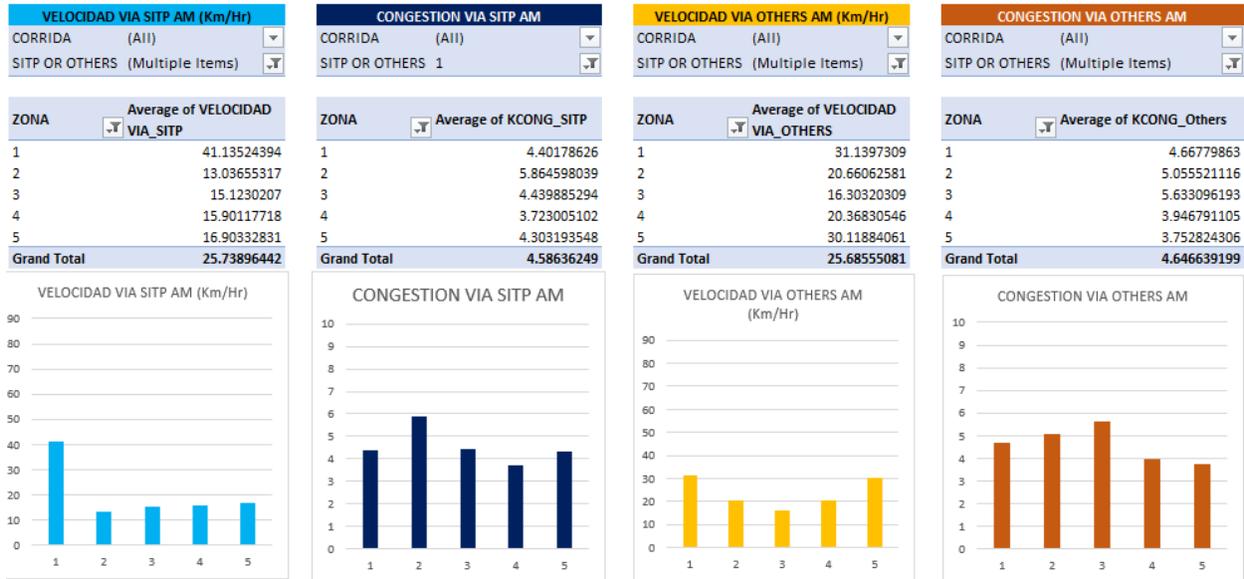


Figura 92. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario AM de Viernes. Fuente: Elaboración Propia

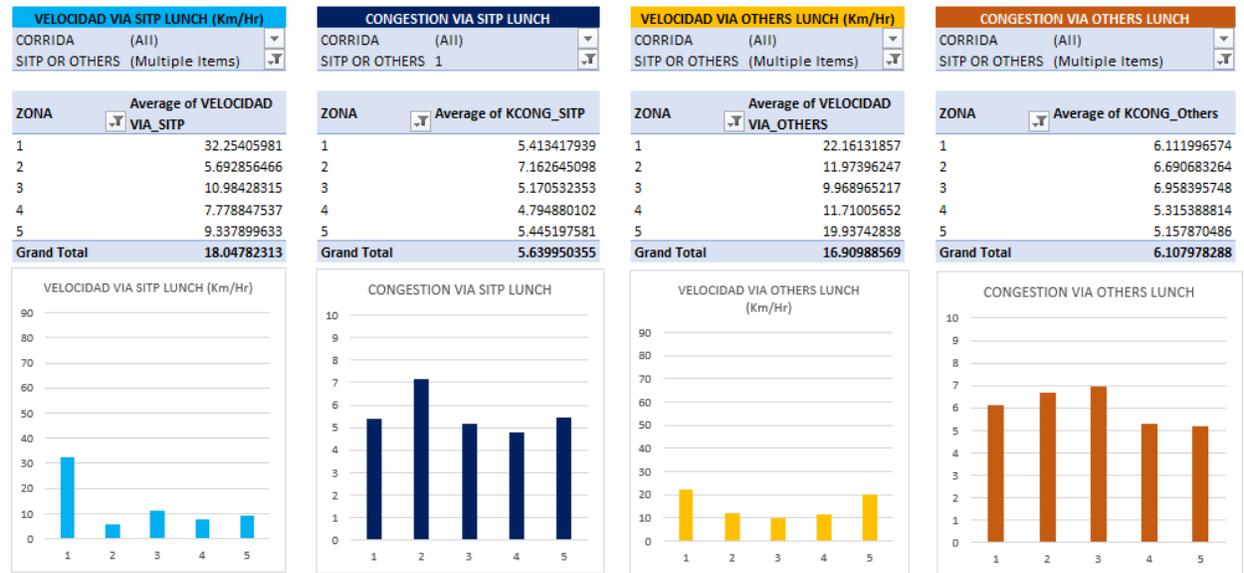


Figura 93. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario LUNCH de Viernes. Fuente: Elaboración Propia

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS DE USOS DE LA MALLA VIAL BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL Y SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES, CHAPINERO, BOGOTÁ.

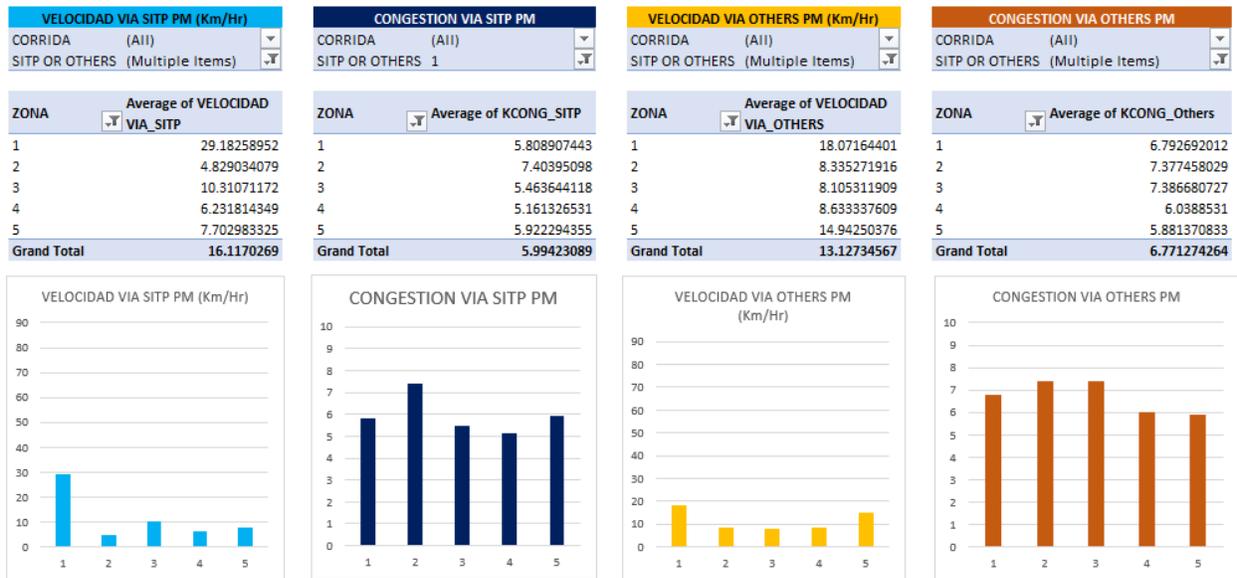


Figura 94. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario PM de viernes. Fuente: Elaboración Propia

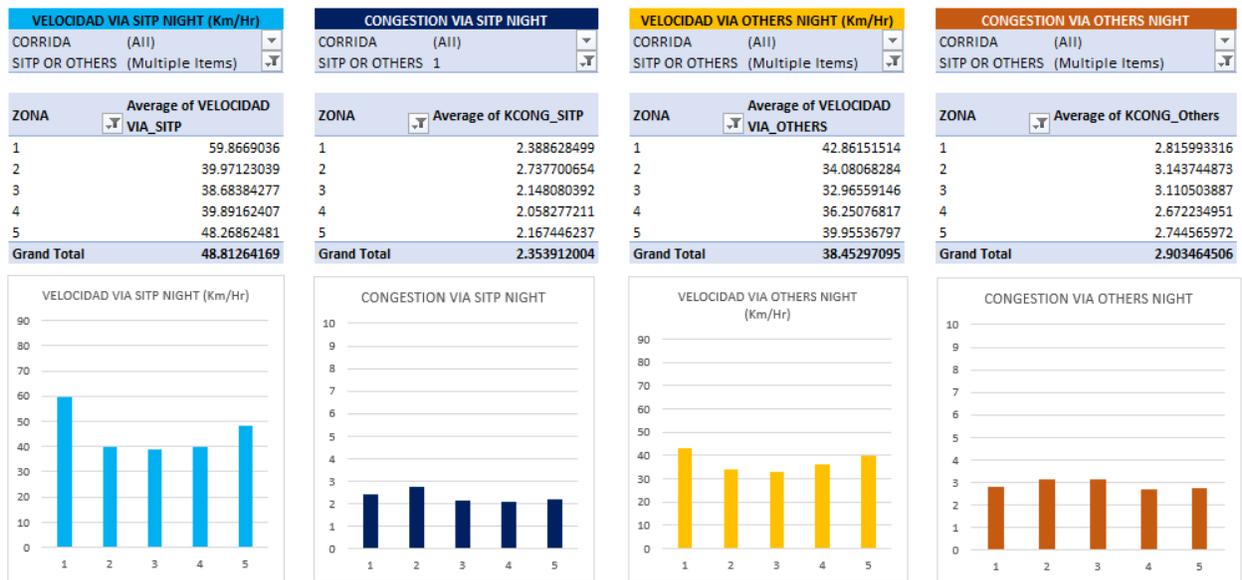


Figura 95. Resultados de Velocidad y Congestión promedio de vías en propuesta, por zona en horario NIGHT de viernes. Fuente: Elaboración Propia

CONSOLIDADO SEMANAL:

En resumen, pueden evidenciarse en la Figura 96 y 97 las velocidades promedio por franja horaria y por día de la semana; en el costado izquierdo se evidencian las velocidades por debajo de 20km/hr marcadas en rojo; las que están entre 20km/hr y 30km/hora en amarillo y las superiores

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS DE USOS DE LA MALLA VIAL BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL Y SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES, CHAPINERO, BOGOTÁ.

a 30km/hr en verde y en el costado derecho un resumen de los promedios diarios, por zona de velocidad por día de la semana. En la Figura 96 las vías por las que circulan buses, y en la 97 las vías por las que circulan carros y taxis (Others).

		VÍAS (VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN)							
		ZONA	DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIE	SAB
VÍAS SITP	AM	1	83.25	43.34	39.22	41.07	40.53	41.14	61.21
		2	65.29	15.42	11.14	13.23	12.38	13.04	39.45
		3	52.31	16.84	13.97	15.41	15.00	15.12	28.21
		4	62.10	18.17	14.47	15.55	14.74	15.90	35.00
		5	79.64	22.00	15.17	16.77	15.58	16.90	47.12
	TOTAL	71.31	28.21	24.02	25.72	25.03	25.74	45.28	
	LUNCH	1	58.39	38.04	33.30	34.66	33.79	32.25	39.25
		2	31.69	10.51	6.75	7.66	6.96	5.69	10.37
		3	24.51	13.70	12.13	12.45	12.00	10.98	13.05
		4	31.64	13.84	8.66	9.52	8.89	7.78	12.05
5		42.96	18.70	11.73	12.97	11.31	9.34	15.66	
TOTAL	29.54	23.62	19.21	20.26	19.44	18.05	23.13		
PM	1	46.54	33.04	30.36	31.37	30.74	29.18	35.23	
	2	16.42	7.03	5.15	5.83	5.27	4.83	8.37	
	3	15.14	11.74	10.57	11.06	10.78	10.31	11.95	
	4	18.32	8.47	6.66	7.37	6.74	6.23	10.61	
	5	26.55	11.48	8.89	9.43	8.58	7.70	14.38	
TOTAL	29.54	19.06	16.89	17.67	17.08	16.12	20.61		
NIGHT	1	78.11	61.55	59.97	61.04	60.84	59.87	66.17	
	2	58.76	40.71	39.14	40.38	39.85	39.97	45.85	
	3	54.69	39.84	38.60	39.08	39.24	38.68	42.18	
	4	56.65	41.37	39.96	40.10	40.38	39.89	45.54	
	5	66.30	50.00	47.86	48.45	48.96	48.27	56.21	
TOTAL	66.27	50.21	48.65	49.48	49.41	48.81	54.35		

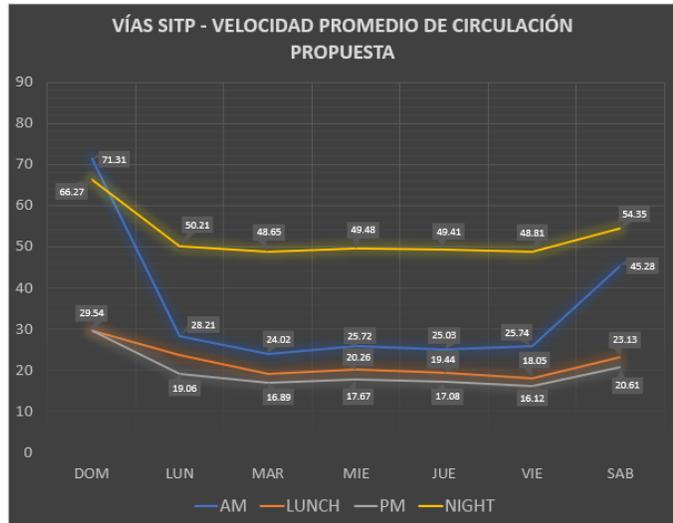


Figura 96. Velocidades promedio percibida en vías con circulación de Buses por zonas, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

		VÍAS (VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN)							
		ZONA	DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIE	SAB
VÍAS OTHERS (CARROS + TAXIS)	AM	1	62.46	32.56	29.49	30.79	30.54	31.14	45.18
		2	54.04	21.94	18.97	20.46	20.04	20.66	34.15
		3	48.11	18.51	15.38	16.65	16.06	16.30	27.65
		4	56.35	22.75	19.16	20.33	19.83	20.37	36.01
		5	66.30	32.75	47.86	29.95	29.37	30.12	46.58
	TOTAL	57.96	27.47	24.16	25.52	25.10	25.69	39.72	
	LUNCH	1	42.75	26.54	22.61	23.58	23.06	22.16	27.96
		2	15.93	15.93	12.29	13.48	12.69	11.97	17.23
		3	24.03	13.50	10.41	11.21	10.65	9.97	12.92
		4	32.48	17.34	12.57	13.49	12.89	11.71	16.82
5		43.59	26.21	20.65	22.01	20.74	19.94	27.17	
TOTAL	36.93	21.54	17.41	17.75	17.75	16.91	22.32		
PM	1	32.35	21.64	19.10	19.86	19.31	18.07	22.75	
	2	20.15	11.45	9.22	9.87	9.23	8.34	12.20	
	3	14.61	10.18	8.43	8.96	8.72	8.11	9.87	
	4	20.83	12.02	9.51	10.19	9.50	8.63	13.32	
	5	31.89	19.38	15.96	17.05	15.98	14.94	20.20	
TOTAL	26.04	16.55	14.02	14.78	14.14	13.13	17.28		
NIGHT	1	56.77	44.39	43.00	43.73	43.54	42.86	47.45	
	2	47.16	35.43	34.05	34.75	34.54	34.08	38.51	
	3	46.28	34.15	32.85	33.34	33.48	32.97	36.84	
	4	49.90	38.04	36.39	36.73	36.73	36.25	41.29	
	5	52.31	41.78	39.98	40.75	40.40	39.96	44.37	
TOTAL	51.73	39.97	38.50	39.17	39.00	38.45	42.86		

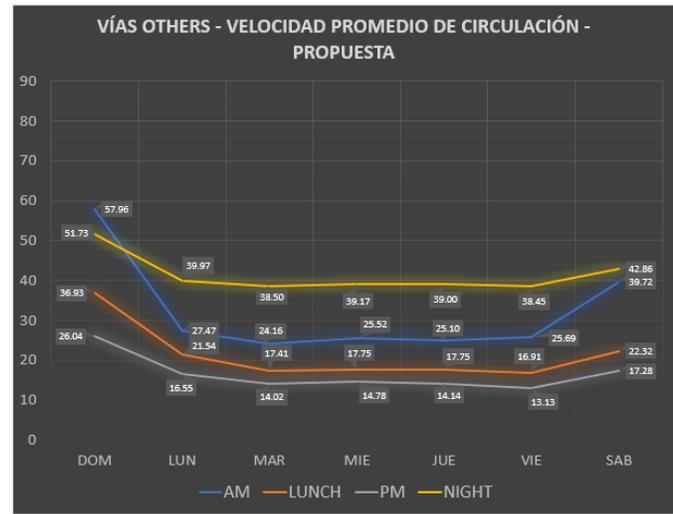


Figura 97. Velocidades promedio percibida en vías con circulación de Others por zonas, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

Estas gráficas permiten evidenciar que el día con mejor velocidad de circulación en la zona es el domingo, con velocidades de vías con buses de hasta 71km/hr en la franja horaria de la mañana; y velocidades de vías con circulación de Others de hasta 58km/hr. Así como los días con velocidades críticas de 13km/hr y 16km/hr, lunes a viernes en la franja horaria de la tarde, tanto para las vías con buses, como para las vías de Others.

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS DE USOS DE LA MALLA VIAL BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL Y SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES, CHAPINERO, BOGOTÁ.

		VÍAS (CONGESTION)						
		ZONA	DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIE
AM	1	1.07	3.30	4.90	4.35	4.60	4.40	1.50
	2	1.10	4.50	6.49	5.78	6.14	5.86	1.83
	3	1.17	3.54	4.75	4.42	4.66	4.44	1.99
	4	1.08	2.78	4.15	3.76	3.95	3.72	1.37
	5	1.05	3.04	4.95	4.20	4.58	4.30	1.31
	TOTAL	1.09	3.47	5.09	4.54	4.82	4.59	1.60
LUNCH	ZONA	DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIE	SAB
	1	1.37	2.30	4.37	3.85	4.41	5.41	4.08
	2	1.62	3.00	5.68	5.06	5.77	7.16	5.55
	3	1.84	2.52	4.24	3.95	4.33	5.17	4.66
	4	1.84	1.92	3.72	3.27	3.72	4.79	3.58
	TOTAL	1.32	2.05	3.88	3.44	4.09	5.45	4.16
PM	ZONA	DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIE	SAB
	1	1.47	4.30	5.29	4.81	5.30	5.81	2.75
	2	1.61	5.59	6.81	6.27	6.87	7.40	3.61
	3	2.03	4.24	5.09	4.76	5.08	5.46	3.29
	4	1.42	3.64	4.66	4.21	4.74	5.16	2.30
	TOTAL	1.37	4.23	5.37	4.89	5.35	5.92	2.54
NIGHT	ZONA	DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIE	SAB
	1	1.17	2.03	2.35	2.16	2.24	2.39	1.57
	2	1.30	2.42	2.74	2.62	2.68	2.74	1.85
	3	1.34	1.85	2.06	1.97	1.99	2.15	1.65
	4	1.17	1.76	2.03	1.96	2.01	2.06	1.45
	TOTAL	1.16	1.91	2.20	2.10	2.10	2.17	1.55
	TOTAL	1.22	2.03	2.32	2.19	2.25	2.35	1.62

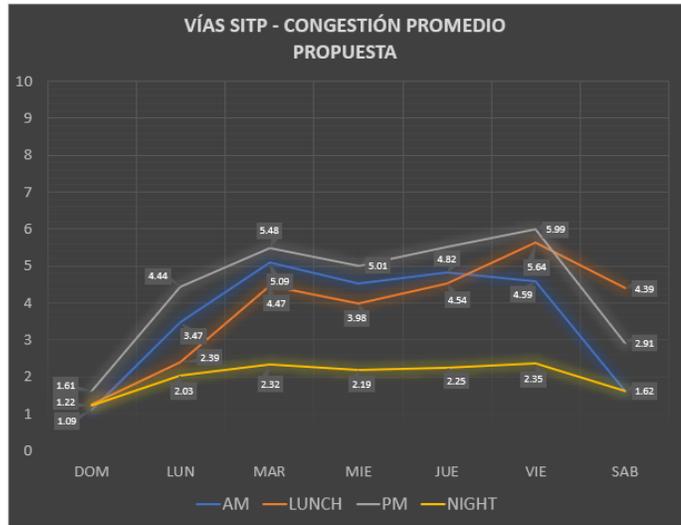


Figura 98. Congestion promedio percibida en vías con circulación de Buses por zonas, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

		VÍAS (CONGESTION)						
		ZONA	DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIE
AM	1	1.06	3.52	5.26	4.64	4.34	4.67	1.49
	2	1.07	3.96	5.68	5.05	5.34	5.06	1.56
	3	1.12	4.50	6.07	5.59	5.84	5.63	2.00
	4	1.05	3.03	4.46	4.05	4.20	3.95	1.28
	5	1.03	2.91	4.25	3.76	3.96	3.75	1.20
	TOTAL	1.06	3.59	5.20	4.64	4.86	4.65	1.50
LUNCH	ZONA	DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIE	SAB
	1	1.36	2.56	5.04	4.46	5.03	6.11	4.36
	2	1.43	2.99	5.68	4.99	5.67	6.69	4.76
	3	1.81	3.42	6.18	5.63	6.19	6.96	5.53
	4	1.24	2.27	4.47	3.98	4.42	5.32	3.72
	TOTAL	1.39	2.70	5.15	4.57	5.13	6.11	4.40
PM	ZONA	DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIE	SAB
	1	1.51	4.69	5.48	5.48	6.07	6.79	3.16
	2	1.64	5.17	6.63	6.03	6.64	7.38	3.73
	3	2.12	5.62	6.79	6.38	6.78	7.39	4.30
	4	1.34	4.05	5.29	4.85	5.37	6.04	2.81
	TOTAL	1.56	3.99	5.18	4.71	5.19	5.88	2.94
NIGHT	ZONA	DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIE	SAB
	1	1.19	2.23	2.71	2.48	2.59	2.82	1.73
	2	1.19	2.23	2.71	2.48	2.59	2.82	1.73
	3	1.40	2.58	2.97	2.84	2.86	3.11	2.02
	4	1.15	2.12	2.51	2.39	2.51	2.67	1.68
	TOTAL	1.12	2.18	2.63	2.42	2.54	2.74	1.76
	TOTAL	1.22	2.32	2.78	2.58	2.69	2.90	1.82

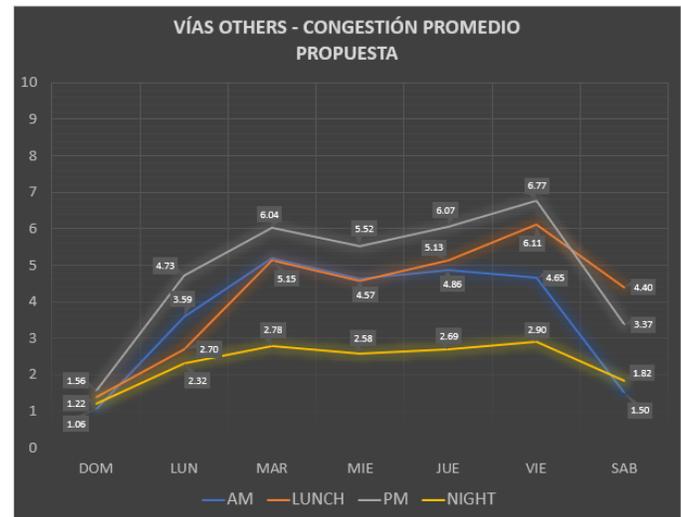


Figura 99. Congestion promedio percibida en vías con circulación de Others por zonas, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

Así mismo, en las figuras 98 y 99 se resumen los datos de congestión de las vías, por zonas y franjas horarias definidas. De la misma manera, el domingo es el día con los índices de congestión más bajos de la semana, índice con valores alrededor de 1; y el viernes es el día más congestionado con índices cerca al valor 6, en la franja horaria de la tarde para todos los tipos de agentes en movimiento.

Adicionalmente, todos los detalles de cálculos obtenidos en los resultados de la simulación de esta propuesta se encuentran detallados en el Anexo 17.

6.3 Comparación de medias y análisis de varianza (Anova)

En los capítulos 6.1 y 6.2 se evidenciaron los diversos resultados encontrados en cada uno de los escenarios, Base (real) y Propuesto. Son evidentes las variaciones en los promedios de velocidades de circulación de los agentes en movimiento y de las condiciones de congestión de las vías. Sin embargo, no basta solamente con ver diferencias, para entender si las variaciones son estadísticamente significativas, y lo más importante si son mejoras reales a la condición inicial. En este caso se realiza un análisis de Anova de 2 factores y múltiples repeticiones para cada uno de los indicadores de eficiencia evaluados.

Se decide realizar la Anova, que es un análisis de varianza de dos vías, ya que este permite analizar la relación entre una variable dependiente cuantitativa (velocidad de circulación, o congestión de la vía dependiendo el caso) y dos variables independientes cualitativas (factores, que en este caso son 2 condiciones completamente diferentes del escenario vial) y en este caso, con múltiples repeticiones (10 para cada caso). El Anova de dos vías permite estudiar, cómo influyen por si solos cada uno de los factores sobre la variable dependiente (modelo aditivo) así como la influencia de las combinaciones que se pueden dar entre ellas (modelo con interacción).

Para cada uno de los días de la semana, se agrupan los datos de velocidades y congestiones por horas, por tipos de vehículos y por corridas, como se muestra en el ejemplo de la Figura 100, donde al lado izquierdo se muestra un fragmento de la tabla de comparación de velocidades de agentes en movimiento, en las filas 10 medidas (10 corridas) de los promedios de velocidad para las 4:00 horas, 5:00 horas, 6:00 horas, etc.; en las columnas el escenario Base y el Escenario Propuesto.

Al lado derecho se muestra un fragmento de la tabla de comparación de las velocidades evidenciadas en las vías dedicadas a Buses SITP, en las filas 10 medidas (10 corridas) de las velocidades para cada una de las zonas definidas: zona 1, zona 2, zona 3, zona 4 y zona 5.

Luego se realiza para cada una de estas tablas generadas un análisis de Anova de dos factores (Base y Propuesta) con réplicas (10 corridas en cada caso). En el *Anexo 17. Bases de Datos detalladas con reportes de resultados de todas las simulaciones Propuesta*, en las pestañas de Anovas se encuentra todo el detalle de las tablas generadas y los reportes completos del análisis de Anova.

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS DE USOS DE LA MALLA VIAL BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL Y SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES, CHAPINERO, BOGOTÁ.

TODOS			VELOCIDAD VÍA SITP LUNCH (Km/Hr)		
HORA	BASE	ESCL		BASE	ESCENARIO 1
4:00	46.05591	41.0102	ZONA		
4:00	41.85549	44.48346	ZONA 1	31.13080386	33.32111754
4:00	40.62016	42.76301	ZONA 1	31.0426415	31.84460333
4:00	40.07931	47.24189	ZONA 1	32.61585838	33.79697176
4:00	43.71951	42.07239	ZONA 1	29.45100725	32.03498276
4:00	45.12521	43.12886	ZONA 1	31.75216985	32.24921583
4:00	43.40857	44.15655	ZONA 1	30.83451131	33.26023155
4:00	46.04648	40.60486	ZONA 1	31.6022767	32.07178544
4:00	43.22647	43.99769	ZONA 1	31.38806663	33.25465861
4:00	46.60465	45.80603	ZONA 1	31.40540551	33.98161363
5:00	36.20751	36.86311	ZONA 1	30.48643561	32.67715776
5:00	35.71927	37.462	ZONA 2	3.982373647	5.437702998
5:00	36.04798	38.64673	ZONA 2	5.181865098	5.547427298
5:00	35.86569	37.2943	ZONA 2	3.874666824	6.190227631
5:00	35.80093	37.19499	ZONA 2	3.700795882	6.522345255
5:00	36.25061	38.1183	ZONA 2	4.30762298	6.070143077
5:00	34.72156	38.37697	ZONA 2	3.575246608	5.795404931
5:00	35.67498	39.24702	ZONA 2	4.672394039	6.484283824
5:00	36.27219	36.8875	ZONA 2	4.663374549	7.723371444
5:00	35.15645	37.91322	ZONA 2	3.429873078	5.689675557
5:00	28.25721	29.11167	ZONA 2	3.93162749	5.455638624
5:00	25.11703	29.96919	ZONA 3	7.686238837	3.787932529
5:00	27.84377	29.66021	ZONA 3	7.860653269	10.51620327
5:00	26.87173	32.84586	ZONA 3	7.226573077	3.130333242
5:00	25.60152	29.72295	ZONA 3	7.743933942	10.44465277
5:00	27.23906	30.80272	ZONA 3	8.785851935	10.41467015
5:00	26.87145	32.06817	ZONA 3	7.994915	10.18301201
5:00	29.11795	30.82178	ZONA 3	7.538761154	10.2382628
6:00	18.56065	21.38777	ZONA 3	6.879060577	10.23452039
6:00	17.64706	19.40071	ZONA 3	7.471259615	9.420074688
6:00	18.98284	20.41579	ZONA 3	3.303182516	3.596788665
6:00	19.79486	18.91516	ZONA 4	5.263426684	7.363356998
6:00	17.52123	20.42619	ZONA 4	5.637893878	7.253122866
6:00	18.77257	19.42358	ZONA 4	6.280375357	8.679623355
6:00	19.13191	19.34175	ZONA 4	6.675390238	8.117984269
			ZONA 4	7.181271837	7.539396459
			ZONA 4	5.943098061	7.225632679
			ZONA 4	5.315353929	8.300629915
			ZONA 4	5.26703898	7.011807168
			ZONA 4	5.913881939	7.470381794
			ZONA 4	6.664090918	6.78454898
			ZONA 5	6.788962177	9.894758452
			ZONA 5	6.615213427	8.905773434
			ZONA 5	6.795738468	9.773343161
			ZONA 5	7.223708548	10.17564915
			ZONA 5	6.625559919	10.04407152
			ZONA 5	8.373725403	12.46523781
			ZONA 5	7.765969234	9.001333972
			ZONA 5	8.849283387	10.61119065
			ZONA 5	6.684241599	10.63463368
			ZONA 5	7.552248145	8.49910676
			Grand Total	16.14935214	18.03450853

Figura 100. Ejemplos de Tablas de Comparación de Medias (Base vs Propuesta), ala izquierda de agentes en movimiento, a la derecha de agentes estáticos, correspondientes al día Viernes. Fuente: Elaboración Propia

A continuación, para facilitar la lectura de las comparaciones totales realizadas, se presenta el resumen de estas, en cada uno de los indicadores de eficiencia definidos, por cada día de la semana:

- Comparación de Medias por hora, por tipo de vehículo. Se presenta el porcentaje de diferencia entre la Base y la propuesta, un resultado positivo indica una mejora en la velocidad (más rápido), un resultado negativo, una disminución en la velocidad media de circulación.

Al final de la imagen se muestra también el p-value de cada Anova realizada, lo que permite evidenciar si la diferencia de medias presentada, para todo el día, es realmente significativa. Si el valor es $<5\%$, es estadísticamente significativo el resultado, es decir que se acepta la hipótesis alternativa de la diferencia de medias; en caso contrario, el nuevo escenario no presenta un cambio estadísticamente significativo.

- Para los indicadores de eficiencia de los agentes estáticos se presentan 2 tablas en la misma imagen. En la parte superior la comparación de velocidades medias por vía, por zona, por franja horaria; en la parte inferior la comparación de congestiones medias por vía, por zona, por franja horaria.

La lógica en este caso indica:

- Para las velocidades, un porcentaje positivo, una mejora en la velocidad; un porcentaje negativo, una disminución de la velocidad de circulación.
 - Para las congestiones, un porcentaje positivo, un incremento en la congestión; en decir que en este caso, la mejora se evidencia en un porcentaje negativo, disminución de la congestión.
- En cuanto al p-value, misma lógica, $<5\%$ variación estadísticamente significativa, de lo contrario, la propuesta no presenta un cambio estadísticamente significativo.

6.3.1 DOMINGO

De acuerdo con la Figura 101, la propuesta aplicada al domingo permite que todos los agentes en movimiento tengan una mejora en la velocidad de circulación de en promedio 3.28% respecto al escenario actual; estadísticamente esta diferencia es significativa. Se evidencia el mismo comportamiento para carros y taxis, sin embargo, para buses estadísticamente no se tiene una variación en significativa.

MOVERS (VELOCIDAD CIRCULACIÓN)				
DOMINGO	DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)			
HORA	TODOS	CARROS	BUSES	TAXIS
4:00	--	--	--	--
5:00	-6.65%	-10.23%	-3.53%	-6.89%
6:00	2.60%	0.60%	4.01%	2.98%
7:00	1.08%	1.04%	1.32%	0.89%
8:00	1.98%	1.83%	2.74%	1.42%
9:00	2.13%	1.68%	3.85%	0.93%
10:00	4.65%	5.17%	4.69%	4.14%
11:00	5.08%	4.66%	5.28%	5.22%
12:00	6.79%	6.29%	6.87%	7.12%
13:00	6.58%	5.90%	7.34%	6.41%
14:00	4.45%	4.53%	3.57%	5.28%
15:00	3.16%	2.72%	3.14%	-2.29%
16:00	3.92%	3.31%	4.30%	4.11%
17:00	5.87%	5.08%	6.21%	6.21%
18:00	8.04%	8.16%	8.58%	7.42%
19:00	7.91%	7.65%	7.75%	8.25%
20:00	4.03%	4.12%	4.74%	3.37%
21:00	2.49%	2.10%	2.65%	2.65%
22:00	2.04%	1.83%	2.14%	2.07%
23:00	1.31%	-6.43%	11.01%	2.80%
TOTAL	3.28%	2.18%	4.37%	3.01%
P-VALUE	0.00%	0.05%	7.28%	0.77%

Figura 101. Resumen de comparación de medias de velocidad de agentes en movimiento para el domingo. Base vs Propuesta Fuente: Elaboración Propia

De esta Figura también se evidencia que durante el día se tienen franjas horarias con mejoras de hasta el 8%, mientras que entre 5:00horas y 6:00 horas las velocidades son menores que las actuales.

Por otro lado, desde la perspectiva de los agentes estáticos, en la Figura 102 se evidencia que las diferencias en las velocidades de circulación no son significativas para el domingo. Mientras que la mayoría de las condiciones de congestión de las vías si presentan mejoras significativas importantes; por ejemplo, las vías dedicadas a buses en horario PM mejoran su congestión en promedio en un 17%, así como las vías para others mejoran hasta un 13%.

ROADS (VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN)								
DOMINGO		DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)						
TIPO	FRANJA HORARIA	ZONA					TOTAL	P-VALUE
		1	2	3	4	5		
SITP	AM	0.47%	-1.06%	0.81%	-0.36%	1.18%	0.24%	4.43%
	LUNCH	1.02%	0.97%	1.05%	1.77%	3.96%	1.80%	4.24%
	PM	2.90%	2.52%	8.16%	2.59%	5.31%	3.93%	4.81%
	NIGHT	0.91%	0.17%	0.86%	0.04%	0.51%	0.52%	71.78%
OTHERS	AM	0.35%	-0.36%	0.21%	-0.89%	0.79%	0.04%	31.99%
	LUNCH	0.98%	1.49%	2.61%	1.17%	2.35%	1.67%	4.51%
	PM	1.81%	2.80%	8.60%	2.32%	3.69%	3.35%	4.90%
	NIGHT	0.57%	0.39%	1.01%	0.18%	1.19%	0.67%	3.11%

ROADS (INDICE DE CONGESTIÓN)								
DOMINGO		DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)						
TIPO	FRANJA HORARIA	ZONA					TOTAL	P-VALUE
		1	2	3	4	5		
SITP	AM	-0.56%	-0.34%	-0.51%	0.07%	-0.51%	-0.37%	85.83%
	LUNCH	-7.49%	-16.98%	-18.72%	-8.12%	-11.88%	-13.46%	0.00%
	PM	-13.44%	-23.03%	-17.57%	-11.84%	-17.49%	-17.21%	0.09%
	NIGHT	-5.85%	-14.21%	-5.73%	-4.84%	-6.73%	-7.71%	0.08%
OTHERS	AM	-0.90%	-0.85%	-1.91%	-1.25%	-0.46%	-1.09%	0.30%
	LUNCH	-7.76%	-11.86%	-13.97%	-9.59%	-5.86%	-10.31%	0.03%
	PM	-11.91%	-15.06%	-13.50%	-14.81%	-11.34%	-13.42%	3.81%
	NIGHT	-5.84%	-7.39%	-6.55%	-7.50%	-5.81%	-6.63%	70.23%

Figura 102. Resumen de comparación de medias de velocidad y congestión promedio en vías para el domingo. Base vs Propuesta Fuente: Elaboración Propia

6.3.2 LUNES

De acuerdo con la Figura 103, la propuesta aplicada al lunes permite que todos los agentes en movimiento tengan una mejora en la velocidad de circulación de en promedio 10.8% respecto al escenario actual; estadísticamente esta diferencia es significativa. Se evidencia el mismo comportamiento para carros y taxis, sin embargo, para buses estadísticamente no se tiene una variación en significativa.

De esta Figura también se evidencia que durante el día se tienen franjas horarias con mejoras de hasta el 21%, mientras que entre 18:00horas y 19:00 horas las velocidades son menores que las actuales, para carros y taxis.

MOVERS (VELOCIDAD CIRCULACIÓN)				
LUNES	DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)			
HORA	TODOS	CARROS	BUSES	TAXIS
4:00	3.63%	-1.33%	1.62%	0.74%
5:00	5.76%	4.35%	5.20%	5.39%
6:00	15.42%	11.60%	13.45%	12.28%
7:00	11.80%	10.46%	15.97%	11.20%
8:00	16.67%	9.46%	12.55%	9.82%
9:00	19.97%	12.38%	17.31%	13.41%
10:00	13.00%	8.99%	10.23%	8.62%
11:00	15.47%	8.97%	7.73%	10.73%
12:00	12.54%	12.60%	9.65%	11.31%
13:00	10.96%	10.81%	9.10%	9.26%
14:00	12.42%	10.99%	10.82%	12.00%
15:00	9.63%	8.97%	9.79%	4.86%
16:00	10.92%	9.51%	7.24%	10.19%
17:00	7.23%	4.56%	9.00%	3.76%
18:00	3.69%	-2.54%	8.38%	-1.41%
19:00	13.86%	7.72%	10.87%	7.56%
20:00	15.33%	11.91%	15.13%	13.10%
21:00	7.05%	8.71%	5.39%	9.26%
22:00	5.62%	9.38%	5.24%	7.03%
23:00	12.70%	21.20%	5.50%	1.01%
TOTAL	10.80%	9.06%	8.88%	7.80%
P-VALUE	0.00%	0.02%	54.12%	5.00%

Figura 103. Resumen de comparación de medias de velocidad de agentes en movimiento para el lunes. Base vs Propuesta Fuente: Elaboración Propia

ROADS (VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN)								
LUNES		DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)						
TIPO	FRANJA HORARIA	ZONA					TOTAL	P-VALUE
		1	2	3	4	5		
SITP	AM	4.39%	26.71%	16.53%	9.57%	26.25%	13.34%	0.14%
	LUNCH	0.09%	13.48%	14.71%	11.54%	14.85%	7.84%	2.46%
	PM	1.14%	43.72%	40.84%	24.34%	26.10%	16.10%	0.00%
	NIGHT	0.52%	1.82%	8.17%	1.82%	4.25%	3.01%	0.00%
OTHERS	AM	3.03%	8.94%	20.77%	10.93%	9.38%	9.36%	0.01%
	LUNCH	-0.07%	7.49%	20.95%	12.31%	8.35%	7.98%	0.00%
	PM	1.01%	10.06%	33.39%	20.88%	5.66%	10.22%	0.00%
	NIGHT	0.11%	1.18%	4.76%	2.56%	1.86%	1.96%	0.00%

ROADS (INDICE DE CONGESTIÓN)								
LUNES		DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)						
TIPO	FRANJA HORARIA	ZONA					TOTAL	P-VALUE
		1	2	3	4	5		
SITP	AM	-26.47%	-32.75%	-40.55%	-36.43%	-38.35%	-35.09%	0.00%
	LUNCH	-21.34%	-28.87%	-34.19%	-23.67%	-26.09%	-27.49%	0.00%
	PM	-19.99%	-25.38%	-35.87%	-30.47%	-29.56%	-28.38%	0.00%
	NIGHT	-13.91%	-20.43%	-28.80%	-17.07%	-22.23%	-20.72%	0.00%
OTHERS	AM	-20.24%	-21.82%	-23.36%	-27.12%	-18.68%	-22.38%	0.00%
	LUNCH	-17.47%	-16.14%	-16.87%	-19.63%	-13.73%	-16.79%	0.24%
	PM	-14.22%	-14.87%	-17.26%	-20.69%	-10.48%	-15.69%	0.00%
	NIGHT	-11.47%	-11.07%	-11.14%	-10.35%	-7.40%	-10.36%	6.64%

Figura 104. Resumen de comparación de medias de velocidad y congestión promedio en vías para el lunes. Base vs Propuesta Fuente: Elaboración Propia

6.3.3 MARTES

De acuerdo con la Figura 105, la propuesta aplicada al martes permite que todos los agentes en movimiento tengan una mejora en la velocidad de circulación de en promedio 10.67% respecto al escenario actual; estadísticamente esta diferencia es significativa. Se evidencia el mismo comportamiento para todos los agentes en movimiento.

De esta Figura también se evidencia que durante el día se tienen franjas horarias con mejoras de hasta el 20%, mientras que entre 4:00horas y 5:00 horas las velocidades son menores que las actuales, para todos los agentes.

MOVERS (VELOCIDAD CIRCULACIÓN)				
MARTES	DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)			
HORA	TODOS	CARROS	BUSES	TAXIS
4:00	-0.48%	-0.32%	-1.05%	-0.16%
5:00	6.29%	5.69%	6.90%	6.19%
6:00	14.89%	16.20%	11.51%	17.49%
7:00	6.70%	4.38%	8.83%	6.28%
8:00	7.67%	4.64%	11.01%	6.89%
9:00	7.04%	6.37%	8.21%	6.37%
10:00	8.24%	5.73%	11.91%	6.66%
11:00	12.17%	9.54%	16.00%	10.34%
12:00	10.85%	9.24%	13.97%	8.85%
13:00	9.53%	8.87%	11.78%	7.80%
14:00	15.84%	15.64%	14.51%	17.45%
15:00	15.79%	18.22%	12.20%	11.88%
16:00	13.49%	14.59%	11.96%	14.26%
17:00	6.16%	4.97%	8.40%	4.81%
18:00	3.14%	2.46%	4.91%	2.00%
19:00	6.46%	5.12%	8.22%	5.72%
20:00	17.93%	20.39%	15.61%	18.37%
21:00	11.40%	12.53%	8.05%	13.75%
22:00	8.12%	8.18%	7.41%	8.72%
23:00	26.38%	14.97%	22.96%	42.14%
TOTAL	10.67%	9.72%	10.44%	11.47%
P-VALUE	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Figura 105. Resumen de comparación de medias de velocidad de agentes en movimiento para el martes. Base vs Propuesta Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, desde la perspectiva de los agentes estáticos, en la Figura 106 se evidencia que las diferencias en las velocidades de circulación también son significativas. Así mismo, todas las condiciones de congestión de las vías también presentan mejoras significativas importantes; por ejemplo, las vías dedicadas a buses en horario LUNCH mejoran su congestión en promedio en un 29.22%, así como las vías para others mejoran hasta un 14.18%.

ROADS (VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN)								
MARTES		DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)						
TIPO	FRANJA HORARIA	ZONA					TOTAL	P-VALUE
		1	2	3	4	5		
SITP	AM	3.53%	24.84%	25.70%	18.30%	28.10%	14.61%	4.51%
	LUNCH	1.50%	29.73%	39.53%	16.99%	30.04%	14.96%	0.00%
	PM	1.59%	32.30%	40.75%	18.84%	23.91%	13.99%	0.00%
	NIGHT	0.60%	2.19%	7.30%	3.58%	4.68%	3.37%	0.01%
OTHERS	AM	2.58%	8.92%	19.57%	14.83%	6.79%	8.88%	0.04%
	LUNCH	1.54%	9.95%	26.52%	16.07%	5.73%	9.02%	0.00%
	PM	1.47%	10.81%	27.53%	18.84%	6.24%	9.58%	0.00%
	NIGHT	0.54%	2.16%	4.18%	3.22%	2.38%	2.38%	0.13%

ROADS (INDICE DE CONGESTIÓN)								
MARTES		DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)						
TIPO	FRANJA HORARIA	ZONA					TOTAL	P-VALUE
		1	2	3	4	5		
SITP	AM	-20.00%	-24.67%	-38.26%	-33.21%	-29.43%	-29.22%	0.00%
	LUNCH	-21.56%	-27.44%	-37.71%	-29.05%	-32.96%	-29.92%	0.00%
	PM	-16.46%	-21.46%	-33.42%	-26.64%	-23.82%	-24.49%	0.00%
	NIGHT	-13.82%	-20.44%	-29.05%	-17.55%	-19.50%	-20.25%	0.00%
OTHERS	AM	-13.00%	-15.17%	-19.90%	-23.78%	-13.23%	-17.21%	0.00%
	LUNCH	-15.11%	-13.88%	-14.55%	-16.95%	-9.74%	-14.18%	0.00%
	PM	-11.30%	-10.99%	-14.66%	-16.67%	-7.66%	-12.41%	0.00%
	NIGHT	-10.18%	-8.97%	-10.49%	-11.33%	-5.72%	-9.38%	0.39%

Figura 106. Resumen de comparación de medias de velocidad y congestión promedio en vías para el martes. Base vs Propuesta Fuente: Elaboración Propia

6.3.4 MIÉRCOLES

De acuerdo con la Figura 107, la propuesta aplicada al miércoles permite que todos los agentes en movimiento tengan una mejora en la velocidad de circulación de en promedio 12.51% respecto al escenario actual; estadísticamente esta diferencia es significativa. Se evidencia el mismo comportamiento para todos los agentes en movimiento.

De esta Figura también se evidencia que durante el día se tienen franjas horarias con mejoras de hasta el 40%, en ningún momento del día se presentan variables que no sean mejores al escenario actual.

MOVERS (VELOCIDAD CIRCULACIÓN)				
MIÉRCOLES	DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)			
HORA	TODOS	CARROS	BUSES	TAXIS
4:00	5.63%	4.93%	4.33%	7.54%
5:00	4.56%	3.22%	5.79%	4.48%
6:00	13.54%	13.59%	12.42%	14.71%
7:00	9.86%	8.26%	11.64%	9.24%
8:00	10.23%	6.38%	15.12%	8.37%
9:00	8.39%	8.16%	11.00%	5.94%
10:00	14.77%	13.30%	18.67%	11.76%
11:00	9.49%	7.53%	14.05%	6.48%
12:00	11.85%	11.34%	12.88%	11.32%
13:00	14.15%	15.04%	12.74%	14.87%
14:00	16.17%	15.33%	16.12%	16.93%
15:00	14.38%	15.81%	12.72%	8.73%
16:00	20.21%	20.90%	19.49%	20.29%
17:00	9.72%	7.91%	12.94%	7.91%
18:00	4.29%	3.66%	6.42%	2.71%
19:00	11.14%	10.11%	13.01%	10.07%
20:00	14.48%	16.49%	12.09%	15.34%
21:00	11.60%	13.93%	8.47%	12.68%
22:00	9.50%	11.24%	7.27%	10.25%
23:00	31.59%	34.04%	29.21%	41.32%
TOTAL	12.51%	12.66%	12.49%	12.69%
P-VALUE	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Figura 107. Resumen de comparación de medias de velocidad de agentes en movimiento para el miércoles.
Base vs Propuesta Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, desde la perspectiva de los agentes estáticos, en la Figura 108 se evidencia que la mayoría de las diferencias en las velocidades de circulación también son significativas. Así mismo, la mayoría de las condiciones de congestión de las vías también presentan mejoras significativas importantes; por ejemplo, las vías dedicadas a buses en horario AM mejoran su congestión en promedio en un 31.77%, así como las vías para others mejoran hasta un 18.94%.

ROADS (VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN)								
MIÉRCOLES		DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)						
TIPO	FRANJA HORARIA	ZONA					TOTAL	P-VALUE
		1	2	3	4	5		
SITP	AM	4.84%	36.01%	24.31%	11.31%	19.24%	14.22%	12.47%
	LUNCH	3.51%	31.94%	39.04%	17.23%	27.11%	16.06%	0.02%
	PM	3.69%	40.26%	45.81%	21.62%	27.23%	17.30%	0.00%
	NIGHT	1.22%	1.86%	5.93%	-0.79%	1.92%	1.89%	0.05%
OTHERS	AM	3.53%	10.85%	22.19%	11.20%	6.26%	9.13%	0.47%
	LUNCH	2.51%	3.34%	21.99%	17.97%	13.16%	10.04%	10.28%
	PM	3.11%	12.91%	32.99%	18.06%	9.68%	11.90%	0.00%
	NIGHT	0.72%	1.65%	3.41%	0.60%	1.94%	1.59%	0.22%

ROADS (INDICE DE CONGESTIÓN)								
MIÉRCOLES		DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)						
TIPO	FRANJA HORARIA	ZONA					TOTAL	P-VALUE
		1	2	3	4	5		
SITP	AM	-22.89%	-28.90%	-38.25%	-33.01%	-34.90%	-31.77%	0.00%
	LUNCH	-23.96%	-29.85%	-38.10%	-29.30%	-34.89%	-31.49%	0.00%
	PM	-20.40%	-23.78%	-34.36%	-27.78%	-27.90%	-26.93%	0.00%
	NIGHT	-14.79%	-17.18%	-27.70%	-13.30%	-18.53%	-18.49%	0.00%
OTHERS	AM	-16.52%	-18.46%	-20.51%	-23.00%	-15.36%	-18.94%	0.00%
	LUNCH	-16.62%	-16.72%	-15.58%	-16.83%	-11.58%	-15.62%	0.03%
	PM	-13.86%	-13.95%	-15.48%	-17.21%	-10.36%	-14.30%	0.00%
	NIGHT	-10.86%	-8.49%	-7.86%	-7.33%	-6.33%	-8.21%	7.82%

Figura 108. Resumen de comparación de medias de velocidad y congestión promedio en vías para el miércoles. Base vs Propuesta Fuente: Elaboración Propia

6.3.5 JUEVES

De acuerdo con la Figura 109, la propuesta aplicada al jueves permite que todos los agentes en movimiento tengan una mejora en la velocidad de circulación de en promedio 6.95% respecto al escenario actual; estadísticamente esta diferencia es significativa. Se evidencia el mismo comportamiento para carros, buses y taxis.

De esta Figura también se evidencia que durante el día se tienen franjas horarias con mejoras de hasta el 16%, mientras que entre 18:00horas y 19:00 horas las velocidades son menores que las actuales, para todos los agentes en movimiento.

MOVERS (VELOCIDAD CIRCULACIÓN)				
JUEVES	DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)			
HORA	TODOS	CARROS	BUSES	TAXIS
4:00	1.51%	0.74%	0.04%	3.80%
5:00	2.02%	3.77%	0.65%	1.96%
6:00	12.91%	15.08%	7.84%	16.53%
7:00	4.27%	5.94%	1.74%	5.51%
8:00	6.02%	8.82%	2.62%	7.58%
9:00	11.61%	10.79%	11.76%	12.32%
10:00	5.48%	6.54%	3.98%	6.33%
11:00	8.29%	11.69%	3.32%	11.29%
12:00	7.52%	7.52%	7.83%	7.19%
13:00	10.00%	11.93%	6.14%	12.79%
14:00	11.45%	13.85%	9.17%	11.95%
15:00	10.68%	12.48%	5.44%	9.47%
16:00	11.08%	13.01%	8.19%	12.77%
17:00	0.80%	-0.48%	1.48%	1.09%
18:00	-0.87%	-0.47%	-1.60%	-0.46%
19:00	7.23%	8.71%	5.21%	8.14%
20:00	12.40%	13.98%	7.87%	15.82%
21:00	9.59%	11.80%	5.77%	11.64%
22:00	5.10%	7.18%	1.37%	7.13%
23:00	4.91%	5.62%	2.61%	9.34%
TOTAL	6.95%	8.22%	4.32%	8.63%
P-VALUE	0.00%	0.00%	4.84%	0.00%

Figura 109. Resumen de comparación de medias de velocidad de agentes en movimiento para el jueves. Base vs Propuesta Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, desde la perspectiva de los agentes estáticos, en la Figura 110 se evidencia que la mayoría de las diferencias en las velocidades de circulación son significativas. Mientras que todas de las condiciones de congestión de las vías si presentan mejoras significativas importantes; por ejemplo, las vías dedicadas a buses en horario PM mejoran su congestión en promedio en un 23.59%, así como las vías para others mejoran hasta un 11.94%.

ROADS (VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN)								
JUEVES		DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)						
TIPO	FRANJA HORARIA	ZONA					TOTAL	P-VALUE
		1	2	3	4	5		
SITP	AM	4.17%	24.10%	20.11%	14.38%	12.00%	11.41%	62.56%
	LUNCH	4.20%	33.92%	34.77%	22.70%	15.45%	14.76%	0.46%
	PM	4.59%	29.50%	38.49%	21.21%	8.06%	13.45%	0.00%
	NIGHT	1.27%	0.49%	7.66%	0.94%	2.46%	2.37%	0.01%
OTHERS	AM	3.76%	8.82%	17.07%	12.77%	4.65%	8.04%	1.20%
	LUNCH	3.53%	11.51%	27.50%	18.96%	4.95%	10.23%	0.00%
	PM	3.92%	12.49%	31.96%	14.32%	4.15%	9.98%	0.00%
	NIGHT	0.70%	1.16%	4.50%	0.96%	1.19%	1.60%	0.07%

ROADS (INDICE DE CONGESTIÓN)								
JUEVES		DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)						
TIPO	FRANJA HORARIA	ZONA					TOTAL	P-VALUE
		1	2	3	4	5		
SITP	AM	-19.95%	-25.78%	-36.39%	-34.24%	-31.33%	-29.66%	0.00%
	LUNCH	-21.31%	-28.12%	-37.36%	-32.42%	-30.44%	-30.10%	0.00%
	PM	-15.74%	-20.52%	-32.47%	-26.02%	-22.66%	-23.59%	0.00%
	NIGHT	-12.93%	-16.25%	-26.88%	-15.08%	-13.53%	-17.08%	0.00%
OTHERS	AM	-15.20%	-16.36%	-19.25%	-24.99%	-13.80%	-18.08%	0.00%
	LUNCH	-15.52%	-15.95%	-15.22%	-20.32%	-8.74%	-15.36%	0.00%
	PM	-9.94%	-11.82%	-14.30%	-15.96%	-6.51%	-11.94%	0.00%
	NIGHT	-9.28%	-8.44%	-8.76%	-6.92%	-3.15%	-7.43%	0.02%

Figura 110. Resumen de comparación de medias de velocidad y congestión promedio en vías para el jueves. Base vs Propuesta Fuente: Elaboración Propia

6.3.6 VIERNES

De acuerdo con la Figura 111, la propuesta aplicada al viernes permite que todos los agentes en movimiento tengan una mejora en la velocidad de circulación de en promedio 8.36% respecto al escenario actual; estadísticamente esta diferencia es significativa. Se evidencia el mismo comportamiento para todos los agentes en movimiento.

De esta Figura también se evidencia que durante el día se tienen franjas horarias con mejoras de hasta el 16%, en ninguna hora del día se presentan condiciones de velocidad que no sean mejores a las actuales.

MOVERS (VELOCIDAD CIRCULACIÓN)				
VIERNES	DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)			
HORA	TODOS	CARROS	BUSES	TAXIS
4:00	3.96%	5.04%	4.70%	2.55%
5:00	6.33%	5.20%	5.72%	4.94%
6:00	13.77%	15.50%	11.58%	14.61%
7:00	11.62%	10.05%	13.06%	10.42%
8:00	10.77%	9.40%	12.92%	8.85%
9:00	9.78%	7.48%	12.30%	8.19%
10:00	9.80%	7.06%	12.21%	8.54%
11:00	10.33%	7.34%	14.54%	7.59%
12:00	7.09%	4.48%	10.40%	5.02%
13:00	8.87%	7.43%	11.16%	6.47%
14:00	3.58%	2.50%	4.92%	2.36%
15:00	9.44%	6.61%	13.73%	6.02%
16:00	9.95%	7.52%	12.77%	8.05%
17:00	4.17%	1.65%	7.37%	2.47%
18:00	2.19%	0.76%	4.54%	0.46%
19:00	5.93%	4.20%	8.53%	3.83%
20:00	7.25%	5.94%	8.16%	6.40%
21:00	14.15%	15.89%	11.15%	14.20%
22:00	12.67%	12.50%	9.38%	13.84%
23:00	4.69%	4.75%	3.30%	5.91%
TOTAL	8.36%	7.51%	9.08%	7.38%
P-VALUE	0.00%	0.00%	0.20%	0.00%

Figura 111. Resumen de comparación de medias de velocidad de agentes en movimiento para el viernes.
Base vs Propuesta Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, desde la perspectiva de los agentes estáticos, en la Figura 112 se evidencia que la mayoría de las diferencias en las velocidades de circulación también son significativas. Así mismo, todas las condiciones de congestión de las vías también presentan mejoras significativas importantes; por ejemplo, las vías dedicadas a buses en horario AM mejoran su congestión en promedio en un 31.97%, así como las vías para others mejoran hasta un 19.73%.

ROADS (VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN)								
VIERNES		DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)						
TIPO	FRANJA HORARIA	ZONA					TOTAL	P-VALUE
		1	2	3	4	5		
SITP	AM	4.43%	29.91%	19.58%	19.26%	26.82%	15.06%	19.08%
	LUNCH	3.47%	37.78%	39.94%	29.34%	27.44%	16.91%	0.06%
	PM	2.82%	40.05%	43.68%	31.93%	23.66%	16.61%	0.00%
	NIGHT	0.27%	0.62%	5.57%	1.29%	3.24%	2.01%	0.38%
OTHERS	AM	4.77%	9.10%	17.54%	13.75%	9.39%	9.84%	7.41%
	LUNCH	4.63%	11.44%	28.71%	17.13%	7.60%	11.08%	0.16%
	PM	3.19%	9.44%	30.82%	15.78%	8.15%	10.44%	0.00%
	NIGHT	0.16%	0.73%	2.88%	1.48%	2.42%	1.48%	0.12%

ROADS (INDICE DE CONGESTIÓN)								
VIERNES		DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)						
TIPO	FRANJA HORARIA	ZONA					TOTAL	P-VALUE
		1	2	3	4	5		
SITP	AM	-22.91%	-28.46%	-38.52%	-34.62%	-34.75%	-31.97%	0.00%
	LUNCH	-19.64%	-22.63%	-36.65%	-27.55%	-27.89%	-26.98%	0.00%
	PM	-16.07%	-19.99%	-32.63%	-24.86%	-21.94%	-23.18%	0.00%
	NIGHT	-11.50%	-20.06%	-27.19%	-15.11%	-20.73%	-19.20%	0.00%
OTHERS	AM	-17.08%	-18.48%	-20.22%	-25.50%	-17.25%	-19.73%	0.00%
	LUNCH	-13.38%	-13.00%	-16.90%	-18.23%	-9.93%	-14.46%	0.00%
	PM	-9.76%	-10.00%	-13.60%	-13.06%	-5.80%	-10.64%	0.00%
	NIGHT	-8.73%	-7.59%	-7.19%	-5.43%	-4.57%	-6.78%	0.89%

Figura 112. Resumen de comparación de medias de velocidad y congestión promedio en vías para el viernes. Base vs Propuesta Fuente: Elaboración Propia

6.3.7 SÁBADO

De acuerdo con la Figura 113, la propuesta aplicada al viernes permite que todos los agentes en movimiento tengan una mejora en la velocidad de circulación de en promedio 7.72% respecto al escenario actual; estadísticamente esta diferencia es significativa. Se evidencia el mismo comportamiento para todos los agentes en movimiento.

De esta Figura también se evidencia que durante el día se tienen franjas horarias con mejoras de hasta el 17%, mientras que entre 4:00horas y 5:00 horas las velocidades son iguales que las actuales, para carros y taxis.

MOVERS (VELOCIDAD CIRCULACIÓN)				
SABADO	DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)			
HORA	TODOS	CARROS	BUSES	TAXIS
4:00	2.95%	2.87%	6.06%	0.03%
5:00	2.06%	1.09%	3.63%	1.38%
6:00	3.13%	2.30%	3.40%	3.52%
7:00	4.51%	4.99%	4.94%	3.69%
8:00	6.86%	7.48%	6.65%	6.59%
9:00	5.80%	5.57%	4.69%	7.12%
10:00	6.16%	7.02%	4.56%	6.99%
11:00	9.58%	10.24%	9.04%	9.58%
12:00	6.81%	5.79%	7.99%	6.12%
13:00	7.02%	4.08%	12.32%	4.02%
14:00	11.87%	10.21%	15.31%	9.78%
15:00	10.55%	9.91%	11.11%	7.30%
16:00	15.62%	14.69%	14.88%	17.14%
17:00	13.54%	14.46%	11.76%	14.57%
18:00	10.16%	10.77%	8.12%	11.75%
19:00	14.39%	16.31%	12.87%	14.29%
20:00	11.05%	11.68%	10.43%	11.13%
21:00	7.78%	8.48%	7.40%	7.55%
22:00	7.02%	7.32%	6.71%	7.06%
23:00	6.91%	9.88%	8.58%	8.63%
TOTAL	7.72%	7.93%	8.02%	7.52%
P-VALUE	0.00%	0.00%	0.09%	0.00%

Figura 113. Resumen de comparación de medias de velocidad de agentes en movimiento para el sábado.
Base vs Propuesta Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, desde la perspectiva de los agentes estáticos, en la Figura 114 se evidencia que las diferencias en las velocidades de circulación también son significativas en su mayoría. Así mismo, todas las condiciones de congestión de las vías también presentan mejoras significativas importantes; por ejemplo, las vías dedicadas a buses en horario AM mejoran su congestión en promedio en un 14.88%, así como las vías para others mejoran hasta un 10.49%.

ROADS (VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN)								
SABADO		DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)						
TIPO	FRANJA HORARIA	ZONA					TOTAL	P-VALUE
		1	2	3	4	5		
SITP	AM	2.52%	0.51%	4.03%	-0.30%	6.02%	2.67%	11.36%
	LUNCH	4.82%	27.72%	22.71%	3.88%	18.65%	11.58%	0.98%
	PM	4.12%	17.65%	16.84%	7.72%	5.26%	7.83%	3.76%
	NIGHT	1.14%	0.46%	2.62%	0.54%	3.00%	1.55%	9.62%
OTHERS	AM	1.60%	1.04%	5.81%	1.34%	1.91%	2.12%	37.64%
	LUNCH	3.16%	9.22%	16.02%	6.24%	6.21%	6.99%	1.33%
	PM	2.27%	7.33%	13.19%	10.99%	5.78%	6.69%	3.23%
	NIGHT	0.39%	1.01%	3.15%	1.69%	1.86%	1.55%	2.04%

ROADS (INDICE DE CONGESTIÓN)								
SABADO		DIFERENCIA DE MEDIAS (BASE vs ESC)						
TIPO	FRANJA HORARIA	ZONA					TOTAL	P-VALUE
		1	2	3	4	5		
SITP	AM	-8.20%	-15.79%	-20.95%	-11.55%	-14.09%	-14.88%	0.00%
	LUNCH	-21.94%	-27.44%	-32.08%	-32.55%	-31.21%	-29.14%	0.00%
	PM	-20.82%	-25.23%	-23.81%	-23.58%	-24.36%	-23.69%	0.00%
	NIGHT	-9.79%	-14.54%	-10.69%	-9.55%	-11.24%	-11.34%	1.86%
OTHERS	AM	-7.49%	-10.34%	-14.07%	-12.19%	-6.00%	-10.49%	0.00%
	LUNCH	-15.17%	-17.85%	-17.48%	-23.87%	-14.05%	-17.76%	0.00%
	PM	-16.98%	-13.84%	-9.29%	-16.25%	-7.88%	-12.78%	0.05%
	NIGHT	-9.18%	-8.36%	-4.69%	-8.82%	-4.05%	-7.01%	4.05%

Figura 114. Resumen de comparación de medias de velocidad y congestión promedio en vías para el sábado. Base vs Propuesta Fuente: Elaboración Propia

6.3.8 CONSOLIDADO SEMANAL:

En resumen, pueden evidenciarse en la Figura 115 las variaciones de las velocidades promedio por hora y por día de la semana; en el costado izquierdo se evidencian las variaciones negativas, es decir las que presentan una condición no mejor a la actual, marcadas en rojo; las que están entre el 0% y 5% de mejora de condiciones en amarillo y las superiores a 5% de mejora en verde y en el costado derecho un resumen de los porcentajes promedios diarios totales de variación de velocidad por día de la semana.

Este resumen permite evidenciar que los días con las mejoras más significativas en la velocidad de circulación son los miércoles, lunes y martes con mejoras de 12.51%, 10.8% y 10.67%; los

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS DE USOS DE LA MALLA VIAL BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL Y SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES, CHAPINERO, BOGOTÁ.

jueves y viernes con mejoras entre 6.95% y 8.36%. Mientras que las de los fines de semana no son tan altas, pero si son estadísticamente significativas entre el 3.8% y el 7.72%.

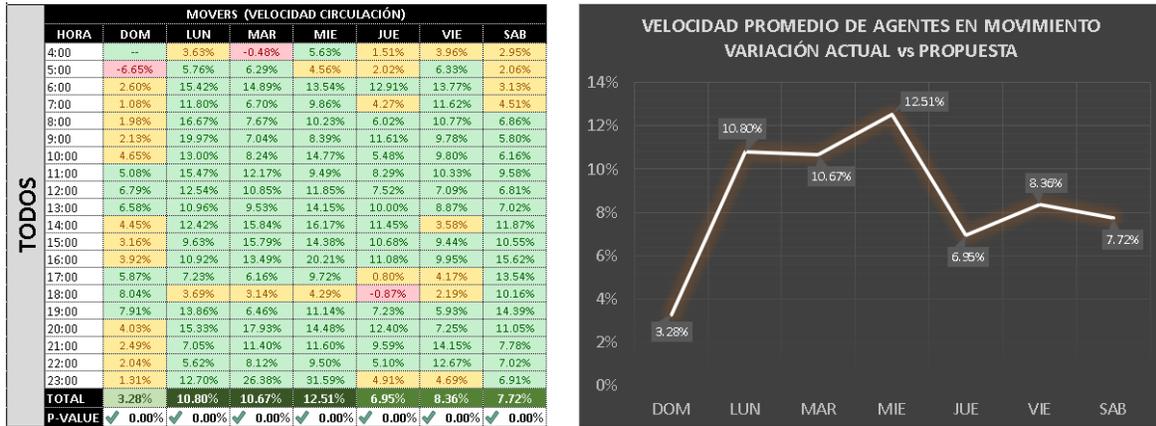


Figura 115. Variación de velocidades promedio por todos los tipos de vehículos, base VS propuesta, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

Así mismo, las Figuras 116 a 119, presentan el detalle de análisis de variación de velocidades de circulación promedio en las vías: tanto dedicadas a buses como a others; así como el análisis de variación de congestión promedio en las vías de los mismos tipos.

Todas las vías en todas las zonas presentan mejoras en la velocidad de circulación promedio percibida, tanto para buses como para others. Para los días entre semana, de lunes a viernes, y en todas las franjas horarias, excepto la nocturna, las variaciones de velocidad oscilan entre el 8% y el 17% de mejora. Para la franja nocturna la mejora está entre el 2% y 3%.

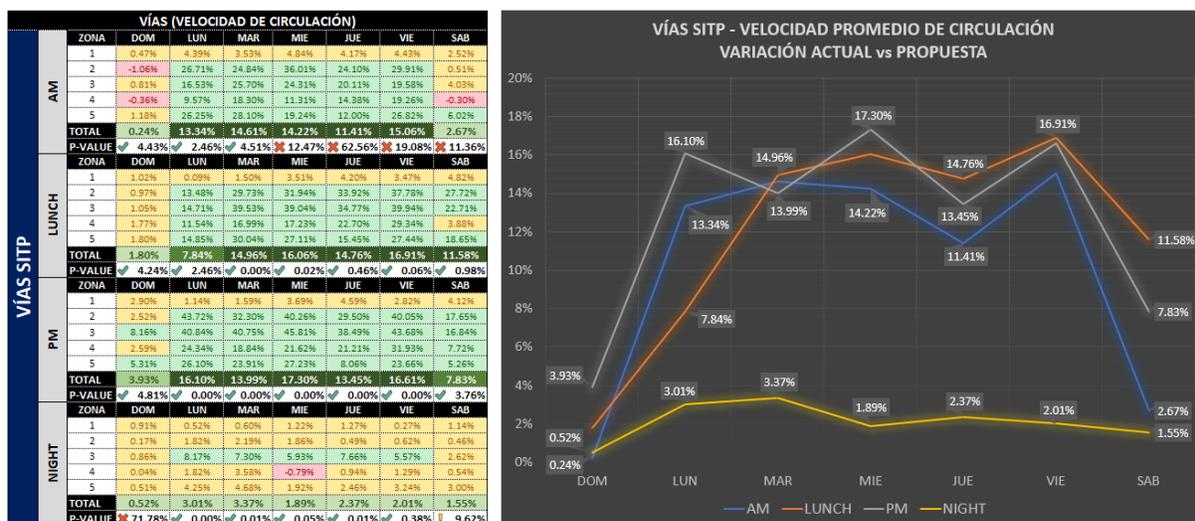


Figura 116. Variación de velocidades promedio en vías dedicadas a Buses, base VS propuesta, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS DE USOS DE LA MALLA VIAL BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL Y SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES, CHAPINERO, BOGOTÁ.

Adicionalmente, en las vías dedicadas a buses, en los fines de semana presentan pequeñas variaciones entre el 0.24% y el 1.5% que estadísticamente son significativas en la mayoría de las franjas horarias.

		VÍAS (VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN)							
		ZONA	DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIÉ	SAB
VÍAS OTHERS (CARROS + TAXIS)	AM	1	0.35%	2.55%	2.55%	3.53%	3.75%	3.77%	1.60%
		2	-0.36%	9.94%	9.92%	10.85%	8.82%	9.10%	1.04%
		3	0.21%	10.77%	19.57%	22.19%	17.07%	17.54%	5.81%
		4	-0.89%	10.59%	14.83%	11.20%	12.77%	13.75%	1.34%
		5	0.51%	9.25%	4.68%	6.24%	4.65%	9.29%	1.91%
	TOTAL	0.04%	9.36%	8.88%	9.13%	8.04%	9.84%	2.12%	
	P-VALUE	31.99%	0.01%	0.04%	0.47%	1.20%	7.41%	37.64%	
	LUNCH	1	0.98%	-0.07%	1.54%	2.51%	3.53%	4.63%	3.16%
		2	7.49%	7.49%	9.95%	3.34%	11.51%	11.44%	9.22%
		3	2.61%	20.95%	26.52%	21.99%	27.50%	28.71%	16.02%
4		1.17%	12.31%	16.07%	17.97%	18.96%	17.13%	6.24%	
5		2.35%	8.35%	5.73%	13.16%	4.95%	7.60%	6.21%	
TOTAL	1.67%	7.98%	9.02%	10.23%	10.23%	11.08%	6.99%		
P-VALUE	4.51%	0.00%	0.00%	10.28%	0.00%	0.16%	1.33%		
PM	1	1.81%	1.01%	1.47%	3.11%	3.92%	3.19%	2.27%	
	2	2.80%	10.06%	10.81%	12.91%	12.49%	9.44%	7.33%	
	3	8.60%	33.39%	27.53%	32.99%	31.96%	30.82%	13.19%	
	4	2.32%	20.88%	18.84%	18.06%	14.32%	15.78%	10.99%	
	5	3.69%	5.66%	6.24%	9.68%	4.15%	8.15%	5.78%	
TOTAL	3.95%	10.22%	9.54%	11.90%	9.98%	10.44%	6.69%		
P-VALUE	4.90%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.23%		
NIGHT	1	0.20%	0.11%	0.54%	0.72%	0.70%	0.16%	0.39%	
	2	0.39%	1.33%	2.16%	1.65%	1.16%	0.73%	1.01%	
	3	1.01%	4.76%	4.18%	3.41%	4.50%	2.89%	3.15%	
	4	0.18%	2.66%	3.22%	0.60%	0.96%	1.48%	1.69%	
	5	1.19%	1.86%	2.38%	1.94%	1.19%	2.42%	1.86%	
TOTAL	0.67%	1.96%	2.38%	1.59%	1.60%	1.48%	1.55%		
P-VALUE	3.11%	0.00%	0.13%	0.22%	0.07%	0.12%	2.04%		

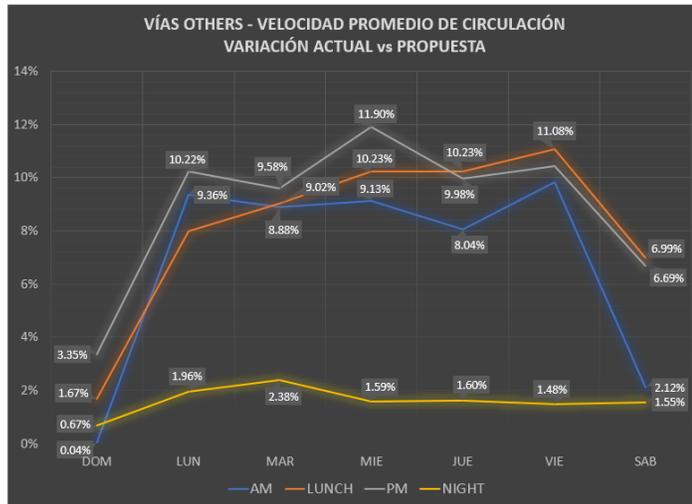


Figura 117. Variación de velocidades promedio en vías dedicadas a Others, base VS propuesta, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

Las variaciones de las vías dedicadas a Others presentan variaciones similares a las descritas en las vías de buses, el detalle de datos se evidencia en la Figura 117. Por otro lado, a pesar de que la variación de velocidades en la franja AM de los miércoles a sábado no presenta un resultado estadísticamente significativo (Figura 116), para las vías dedicadas a buses; el promedio general de todas las zonas y de las vías dedicadas a otros tipos de vehículos si presenta variaciones significativas.

		VÍAS (CONGESTIÓN)							
		ZONA	DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIÉ	SAB
VÍAS SITP	AM	1	-0.56%	-26.47%	-20.00%	-22.89%	-19.95%	-22.91%	-8.20%
		2	-0.94%	-32.75%	-24.67%	-28.90%	-25.78%	-28.46%	-15.79%
		3	-0.51%	-40.55%	-38.26%	-38.55%	-36.39%	-36.52%	-20.85%
		4	0.07%	-35.43%	-33.21%	-33.01%	-34.24%	-34.62%	-11.55%
		5	-0.51%	-39.35%	-39.43%	-34.90%	-31.33%	-34.75%	-14.09%
	TOTAL	-0.37%	-35.09%	-29.22%	-31.77%	-29.66%	-31.97%	-14.88%	
	P-VALUE	85.83%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
	LUNCH	1	-7.49%	-21.34%	-31.56%	-23.96%	-21.31%	-19.64%	-21.94%
		2	-16.98%	-28.87%	-27.44%	-29.85%	-28.12%	-22.63%	-27.44%
		3	-18.72%	-34.19%	-37.71%	-38.10%	-37.36%	-36.65%	-32.08%
4		-18.72%	-23.67%	-29.05%	-29.30%	-32.42%	-27.55%	-32.55%	
5		-8.12%	-26.09%	-32.96%	-34.89%	-30.44%	-27.89%	-31.21%	
TOTAL	-13.46%	-27.49%	-29.92%	-31.49%	-30.10%	-26.98%	-29.14%		
P-VALUE	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%		
PM	1	-13.44%	-19.99%	-16.46%	-20.40%	-15.74%	-16.07%	-20.82%	
	2	-23.03%	-25.38%	-21.46%	-23.78%	-20.52%	-19.99%	-25.23%	
	3	-17.57%	-35.87%	-33.42%	-34.36%	-32.47%	-32.63%	-23.81%	
	4	-11.84%	-30.47%	-26.64%	-27.78%	-26.02%	-24.86%	-23.58%	
	5	-17.49%	-29.56%	-23.82%	-27.90%	-22.66%	-21.94%	-24.36%	
TOTAL	-17.21%	-28.38%	-24.49%	-26.93%	-23.59%	-23.18%	-23.69%		
P-VALUE	0.09%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%		
NIGHT	1	-5.85%	-13.91%	-13.82%	-14.79%	-12.93%	-11.50%	-9.79%	
	2	-14.21%	-20.43%	-20.44%	-17.18%	-16.25%	-20.06%	-14.54%	
	3	-5.73%	-28.30%	-29.05%	-27.70%	-26.88%	-27.19%	-10.69%	
	4	-4.84%	-19.07%	-17.85%	-13.30%	-15.00%	-15.11%	-9.55%	
	5	-6.73%	-22.23%	-19.50%	-18.53%	-13.53%	-20.73%	-11.24%	
TOTAL	-7.71%	-20.72%	-20.25%	-18.49%	-17.08%	-19.20%	-11.34%		
P-VALUE	0.08%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.86%		

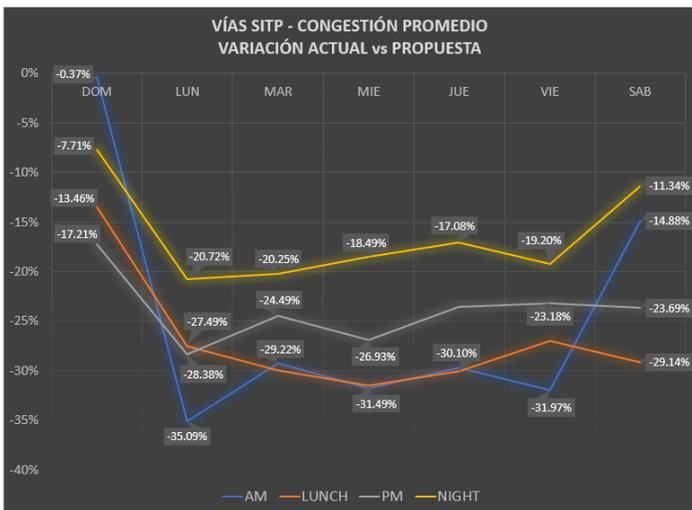


Figura 118. Variación de congestiones promedio en vías dedicadas a Buses, base VS propuesta, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado, en cuanto al análisis comparativo de las congestiones viales, en las Figuras 118 y 119, se tienen los detalles de las variaciones tanto para las vías de buses, como para las vías de others. En términos generales, de lunes a viernes se evidencia una disminución promedio de la congestión para buses desde el 17% hasta el 35%; para others desde 6% hasta en promedio 22%. Mientras que los fines de semana, las disminuciones de congestión de las vías de buses oscilan entre el 1% al 30%; y para others entre el 1% y el 17%.

La mayoría de los análisis de congestión arrojan una significancia >5% en sus comparaciones; solamente el domingo en horario AM y en horario NIGHT no evidencia variaciones significativas.

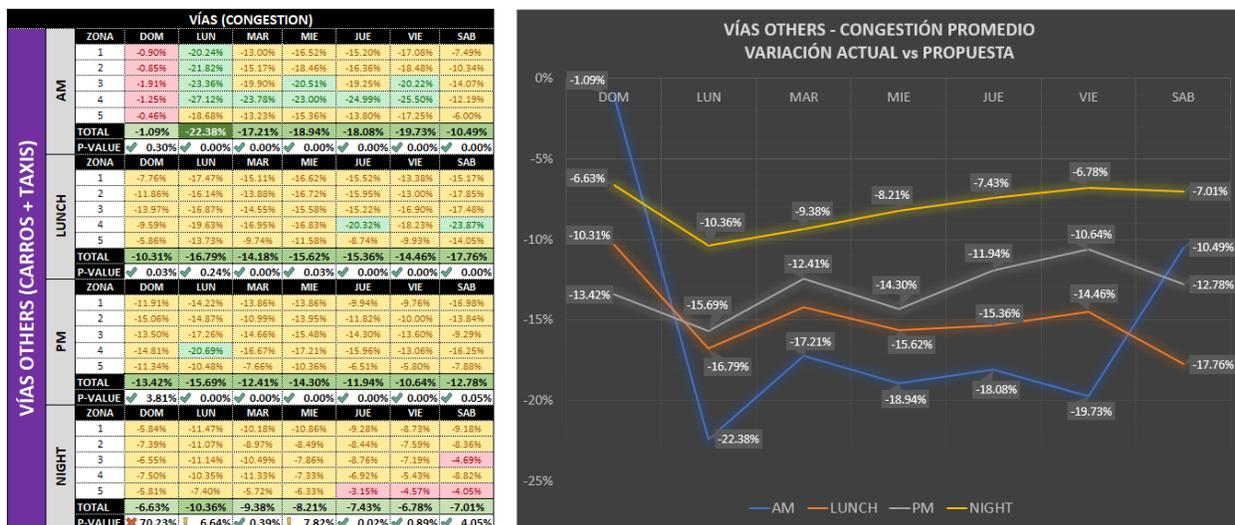


Figura 119. Variación de congestiones promedio en vías dedicadas a Others, base VS propuesta, por franjas de hora. Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con todos los análisis realizados, la propuesta escogida entrega tanto una mejora significativa para la velocidad de circulación de todos los agentes en movimiento (Carros, Buses y Taxis); como una mejora significativa en los promedios de velocidad de circulación y de congestión de las vías de la zona de estudio.

6.3.9 DISCUSIÓN

La utilización de la metodología de análisis espacial en Space Syntax permitió generar una propuesta de lineamiento de usos de las vías en la zona de estudio que generan impactos estadísticamente significativos con velocidades hasta 17% más altas respecto a las actuales; así como una disminución de hasta el 35% de congestiones viales, con baja inversión, tiempos cortos y facilidad de implementación.

A diferencia de otras metodologías de análisis evaluadas en la revisión literaria, esta solución permite involucrar una zona completa de la ciudad, y a la cantidad total de agentes que circulan en ella. Adicionalmente, el trabajar con una simulación multiagentes permite que, cada agente simulado pueda tomar sus propias decisiones haciendo que el modelo se aproxime bastante a la realidad.

El modelo planteado es escalable, puede utilizarse el mismo modelo de simulación para probar estrategias adicionales y sus impactos; así como agregar zonas aledañas o nuevas zonas al alcance de futuras evaluaciones.

Las mejoras encontradas en los promedios de velocidad de circulación y en índices de congestión son estadísticamente significativas a pesar de las desviaciones estándar presentadas (entre el 40% y el 60% de cada media), se reconoce que estos valores podrían cuestionar las mejoras en los promedios evidenciados. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los escenarios de tráfico vehicular incluyen muchas variables que aportan a estas dispersiones: la variedad de tiempos y longitudes de viajes individuales, las rutas calculadas, la diversidad de tipos de vías en las que pueden estarse presentando múltiples y muy amplios rangos de velocidades. Así mismo, estas dispersiones de datos se evidencian desde la información real capturada en la encuesta de movilidad de la ciudad de Bogotá en el 2019 y en los reportes presentados de manera estándar por organizaciones internacionales como TomTom.

Por otro lado, se evidencian algunos resultados contradictorios entre la evaluación de agentes en movimiento y agentes estáticos, como es el caso de los lunes, donde los buses no presentan en general una mejora significativa en su velocidad. Mientras que, en el análisis de vías, todos los resultados presentados son significativos. O en caso de jueves y viernes, donde todos los agentes en movimiento muestran mejoras significativas en las velocidades mientras que los agentes estáticos reportan tanto para las vías dedicadas a buses como a others, que en las franjas AM no hay mejoras significativas en su velocidad. Casos similares se evidencian en los miércoles y sábados. Estas variaciones bien podrían atribuirse a las condiciones reales puntuales que se pueden presentar en determinados horarios, donde las solución planteada no muestre mejoras significativas, mientras que de manera global las condiciones de estos horarios puedan considerarse despreciables respecto a la mejora total del tráfico en toda la semana. Sin embargo, debe reconocerse que dadas las limitaciones descritas del modelo y a la falta de inclusión de todas las condiciones reales posibles, estas contradicciones requieren mayor análisis y posible repuesta en futuros análisis e investigaciones.

La solución principal presentada en la propuesta incluye una redistribución general del tráfico para las vías donde circulan buses, dejando un carril dedicado para estos y el resto de los carriles disponibles para ser compartidos por carros particulares y taxis. Resulta evidente que en este caso, los carriles de transporte público tendrían una mejoría en su velocidad de circulación y congestión de vías; sin embargo, puede resultar polémico el comprender cómo los carriles restantes permitirán una mejor movilidad para carros y taxis con aparentemente menos espacio de circulación. En términos de la simulación y modelo presentado, la explicación lógica para este resultado consiste en que para los carriles restantes ahora se tendrá más espacio disponible ya que, en el espacio de un Bus pueden circular hasta 3 carros o taxis. Sin embargo, llevando la propuesta a un escenario real debe tenerse en cuenta que:

- La mejora de las condiciones de circulación del transporte público debe incentivar al uso de este, disminuyendo progresivamente el uso del transporte privado.
- Es muy importante resaltar que este tipo de acciones requieren de una implementación acertada, la cual requiere una efectiva socialización entre los ciudadanos para que sean

conscientes del nuevo escenario. Sin este plan, el efecto resultante puede ser contrario al esperado y empeorar las condiciones generales del tráfico en la zona.

- Adicionalmente, en el proceso de implementación debe considerarse:
 - Una solución que se encuentre adecuadamente evaluada desde el inicio, con procesos de validación similares a los planteados en el presente proyecto.
 - El monitoreo constante de las posibles controversias que la propuesta puede generar, para enfrentar las críticas y cuestionamientos de la población con hechos contundentes, que puedan ser rápidamente demostrados. Por ejemplo, mejoras en las condiciones actuales del transporte público, que puedan ser efectivamente comunicadas: condiciones de seguridad, capacidad de buses, capacidad de flota disponible, etc; herramientas que permitan medir y comunicar las mejoras en las condiciones de tráfico a medida que se implementen los cambios.
 - Realizar un plan de comunicación y manejo del cambio que permita difundir por todos los medios disponibles los cambios esperados, las fases, posibles complicaciones iniciales y los beneficios que se esperan en el corto, mediano y largo plazo.
 - Flexibilidad para la implementación del plan por etapas, contemplando en cada etapa las zonas más controversiales, y permitiendo el replanteamiento de sus fases en caso de resultados inesperados. Los beneficios que se obtienen en cada fase deben irse comunicando en tiempo real. Ganando así aceptación pública y política.

Las mejoras de velocidad y congestión presentadas en el proyecto pueden contribuir al final a viajes con tiempos de desplazamiento menores para todos los stakeholders de la zona, lo que puede generar impactos muy positivos en la calidad de vida de las personas que se mueven en el espacio y también representar posibles ganancias económicas al reducir en cierto porcentaje el consumo de combustible de los vehículos en la zona, permitir el uso del tiempo ahorrado en otras actividades de bienestar o de negocios que al final representen futuros ingresos; así como, incremento en la cantidad de pedidos que un vehículo dentro la zona pueda entregar y transportar por hora. Sin profundizar en el posible impacto ambiental positivo que podría generarse con la posible reducción de emisiones de CO en la zona de estudio. Todos estos impactos económicos y ambientales, son

sujetos a futuros análisis e investigaciones de los cuales el presente proyecto puede ser punto de partida.

Como oportunidades de mejora y posteriores implementaciones en futuros estudios, se sugiere considerar los supuestos y limitaciones especificados para involucrar agentes viales adicionales como: peatones, motociclistas, usuarios de bicicleta y transportes alternativos y así considerar el escenario completo de movilidad. Así mismo, podrían incluirse y evaluarse semáforos, cruces vehiculares/peatonales, vías adicionales dedicadas temporal o de manera permanente a ciclovías, entre otros.

Capítulo 7.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El objetivo principal de la presente investigación era generar una propuesta de cambio de infraestructura vial que, validado con un modelo de simulación basada en agentes, permitiera disminuir la congestión vial y mejorar las velocidades urbanas en la localidad de Chapinero (UPZ El Refugio y Chicó Lago) de la ciudad de Bogotá; lo cual fue ampliamente desarrollado y aplicado en todo el proceso de investigación. El modelo multi-agentes desarrollado permitió simular, con resultados cercanos a la realidad, las condiciones actuales de la malla vial y permitió generar un punto de partida sólido al cual, al aplicar los cambios propuestos mostró mejoras significativas de los indicadores evaluados, mejoras que alcanzaron velocidades hasta 17% más altas respecto a las actuales; así como una disminución de hasta el 35% de congestiones viales en la zona de estudio.

La caracterización de movilidad de la zona de estudio entendiendo sus usos actuales, recursos disponibles, actores principales, sus diferentes interrelaciones y sus problemáticas principales; permitió el entendimiento profundo de la dinámica de funcionamiento de la zona de estudio, entregando en consecuencia entradas y bases pre-cargadas de calidad al el modelo de simulación, para que al final la precisión del resultado base fuera cercana a la realidad y así, los resultados obtenidos con la propuesta implementada tengan la oportunidad de convertirse en acciones reales a implementar.

Gracias a la herramienta de análisis espacial Space Syntax, adicional a la caracterización realizada a la zona de estudio; se realizó un análisis espacial de las variables de conectividad, intermediación y de integración de la zona. Generando una propuesta que pudo ser validada en el proceso de simulación, está propuesta pretende aportar a algunos de los desafíos principales de la movilidad

que están en: superar la disminución progresiva del uso transporte público, su impacto ambiental y las deficiencias que estos derivan; pérdida de pasajeros y el crecimiento de uso del automóvil o motocicleta.

De esta manera, se ha priorizado el uso del transporte público colectivo, corredores y zonas peatonales; la propuesta incluyó la independización de un carril para circulación exclusiva de buses en las vías que pertenecen a rutas de buses y la definición de uso peatonal exclusivo (peatonalización) a una zona específica de uso de equipamientos (universidades y colegios) y comerciales detalladas en el capítulo 4, diseño de propuesta.

Mediante la validación de la propuesta en el proceso de simulación se encontró que las franjas horarias más efectivas para la aplicación de los cambios mencionados incluyen: independización de las vías de buses para todos los días de la semana, durante las 24 horas del día; mientras que la peatonalización puede implementarse solamente entre semana; de lunes a viernes durante el día completo.

Se decidió realizar la simulación de estos escenarios mediante la dinámica de los modelos y sistemas basados en agentes, ya que estos proporcionan un marco para enfrentar problemas complejos relacionados con la gestión de las ciudades del futuro, como el transporte y la movilidad. Una vez ajustado y validado contra los datos reales (encuesta de movilidad 2019), el uso de esta simulación basada en agentes permitió visualizar y analizar la dinámica compleja de la zona de estudio, no directamente accesible desde el mundo real, en un esquema predictivo y explicativo. El sistema en general se compuso de dos tipos de agentes: en movimiento (carros, buses y taxis) y estáticos (vías y cruces) y de los indicadores que permitieron la evaluación de cada una de las instancias: velocidad de circulación e índices de congestión.

Para determinar si los resultados obtenidos fueron realmente significativos, éstos fueron sujetos a una evaluación estadística adicional, se realizó el análisis de varianzas Anova de dos factores: condición de malla vial en escenario base y condición de malla vial en escenario propuesto; y con múltiples replicaciones: la simulación se corrió 10 veces por cada uno de los días de la semana, tanto para el escenario base, como para el escenario propuesto.

Este análisis Anova pretendía confirmar si la hipótesis alternativa de que, las medias entre las muestras de la simulación de la propuesta eran estadísticamente diferentes a las medias de la

simulación del escenario base, con una significancia (p-value) menor al 5%. Y es así como, mediante esta evaluación se determinó que las condiciones más favorables y estadísticamente significativas, para el escenario evaluado, son la propuesta de independización de vías de buses para toda la semana y, peatonalización de la zona evaluada solamente entre semana, con todos los porcentajes de mejora descritos en detalle en el capítulo 6, resultados y análisis.

Para la implementación de la solución propuesta es necesario realizar un análisis adicional de las medidas que se requieren para su puesta en marcha, como pueden ser: proyecto de señalización y separación de carriles en mención, adecuaciones menores que se requieren en los espacios de parada de buses, para no bloquear el carril independiente de circulación, proyecto de separación para días entre semana de la zona a peatonalizar; capacitación a los conductores de buses de las nuevas rutas y paraderos a utilizar en la zona evaluada; procesos de comunicación y concientización a la población de la localidad y de la ciudad en general para adaptarse y adherirse a estos cambios. Así mismo, una vez realizada esta implementación, se recomienda mantener un plan de seguimiento y medición de estos cambios y así confirmar con datos reales la efectividad de la propuesta aplicada.

Adicionalmente, es muy importante que esta propuesta se incluya en un enfoque integrado, ninguna solución individual puede resolver 100% el problema complejo del tráfico urbano. Por tanto, se necesita actuar coordinadamente sobre las infraestructuras, las innovaciones tecnológicas, la regulación de los servicios, la competencia entre operadores y la vigilancia de las condiciones en que se prestan los servicios, incluso en las entidades locales que regulan la ordenación de usos del suelo. Solo así se puede tener una visión completa de red de transporte, en la que cada actor tendrá unos fines específicos y complementarios del resto.

Como pasos siguientes, está investigación puede tomarse como punto de partida para nuevos estudios:

- Evaluación de condiciones y posibles propuestas para los agentes peatones, bicicletas y motocicletas.
- Evaluaciones a posibles cambios en los sentidos de circulación de vías.
- Prueba de nuevas políticas de operación y funcionamiento de la zona de estudio.
- Extensión de la metodología propuesta a otras zonas de la ciudad.

REFERENCIAS

- Alqurashi, R. a. (2019). Hierarchical Agent-Based Modeling for Improved Traffic Routing. *MDPI, Applied Sciences*.
- Bandini, S., Crociani, L., Feliciani, C., Gorrini, A., & Vizzari, G. (2017). Collision Avoidance Dynamics Among Heterogeneous. *Conference of the Italian Association for Artificial Intelligence; Springer: Berlin, Germany*, 44-57.
- Barbosa, V., & Suarez Pradilla, M. M. (2021). Identifying the Social Urban Spatial Structure of Vulnerability: Towards Climate Change Equity in Bogotá. *Urban Planning (ISSN: 2183-7635)*, 365-379.
- Biedermann, D., Torchiani, C., Kielar, P., Willems, D., Handel, O., Ruzika, S., & Borrmann, A. (2016). A Hybrid and Multiscale Approach to Model and Simulate Mobility in the Context of Public Events. *Transportation Research Procedia 19*, 350-363.
- Boskovich, S. (2014). A Distributed Approach to Dynamic Routing Algorithms Based on Vehicle to Vehicle Interaction. *UC Riverside, CA, USA*.
- Bull, A. (2003). Congestión de Tránsito: el problema y cómo enfrentarlo (No. 87). *United Nations Publications*.
- Calatayud, A., Sanchez G., S., Bedoya m., F., Giraldez, F., & Marquez, J. M. (2021). Congestion Urbana en América Latina y el Caribe: características, costos y mitigación. *Banco Interamericano de Desarrollo, División de Transporte*.
- Camacho, J., Medina, S., & Terán, O. (2012). Simulación del tráfico de autos en una intersección: desde la perspectiva de una plataforma multiagente. *Ciencia e Ingeniería*, 85-93.
- Castán, J., Ibarra, S., Laria, J., Guzman, J., & Castán, E. (2014). Control de tráfico basado en agentes inteligentes. *Polibits*, 61-68.
- CCB, C. (2019). *Mapa Interactivo Decreto de las UPZ*. Obtenido de <http://recursos.ccb.org.co/ccb/pot/PC/files/3distribucion.html>
- Chapinero, A. L. (2019). *UPZ Localidad de Chapinero*. Obtenido de <http://www.chapinero.gov.co/content/upz-la-localidad-chapinero>
- Chiu, S. (1992). Adaptive traffic signal control using fuzzy logic. *In Proceedings of the Intelligent Vehicles 92 Symposium, Detroit, USA.*, 98-107.
- DMRB. (1997). *Design manual for Roads and Bridges, Traffic Flow Ranges for Use in the Assessment of New Rural Roads*.

- Dujardin, Y., Vanderpooten, D., & Boillot, F. (601-610). A multi-objective interactive system for adaptive traffic control. *European Journal of Operational Research*, Vol. 244, 2015.
- Duowei, L., Jianping, W., Ming, X., Ziheng, W., & Kezhen, H. (2020). Adaptive Traffic Signal Control Model on Intersections Based on Deep Reinforcement Learning. *Journal of Advanced Transportation*, Wiley Indawi.
- Feliciani, C., Crociani, L., Gorrini, A., Vizzari, G., Bandini, S., & Nishinari, K. (2017). A simulation model for non-signalized pedestrian crosswalks based on evidence from on field observation. *Intell. Artif.*, 117-138.
- Franco, C., Méndez, G., & Espitia, J. (2015). Evaluación de escenarios de descongestión vehicular en Bogotá D.C. mediante dinámica de sistemas. *Ingeniería*, Vol 20, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 209-231.
- Garnica Monroy, R. (2012). La accesibilidad como instrumento analítico para comprender la organización espacial de la ciudad de México: un estudio a dos escalas usando space syntax. *El Colegio de México ProQuest Dissertations Publishing*, 24.
- Goodwin, P. (2004). The Economic Cost of Road Traffic Congestion. *A Discussion Paper published by the Rail Freight Group*.
- Groot, N. (2013). *Reverse Stackelberg Games: Theory and Applications in Traffic Control*. Netherlands: Gildeprint Drukkerijen.
- Hallé, S., Laumonier, J., & Chaib-Draa, B. (2004). A decentralized approach to collaborative driving coordination. *In Proceedings of the IEEE 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Washington, WA, USA*, 453-458.
- Higuera Arias, C. (2016). Control de Intersecciones Semaforizadas Aplicando Aprendizaje por Refuerzo Multiagente. *Master's Thesis. Andes University, Bogotá, Colombia*.
- Hillier, B., & Vaughan, L. (2007). The City as one thing. *Progress in Planning, UCL Discovery*, 205-230.
- Instituto de Cultura, R. y. (2019). *Localidad de Chapinero. Ficha Básica*. Obtenido de <https://www.culturarecreacionydeporte.gov.co/observatorio/documentos/localidades/chapinero.pdf>
- ITDP. (2011). *INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE Y DESARROLLO*. Obtenido de <http://www.itdp.org/>
- Jaén, S. (2006). Ayudas para la Elaboración de Diagramas Causales. *Universidad de Antioquia*, 1-23.
- Klügl, F., & Bazzan, A. (2012). Agent-Based Modeling and Simulation. *AI Mag*, 33, 29.
- Leticia, A. (2016). MultiAgent Systems: A Survey application aid distribution in kind for humanitarian logistic in. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 156-167.
- Loarte Caraguay, R., & Vasquez, B. (2016). Desarrollo y simulación de un sistema multiagente para la comunicación de semáforos para encontrar la ruta óptima mediante grafos. *Bachelor's Thesis*.

- Manvi, S., & Kakkasageri, M. (2006). Multi-Agent Systems as a Platform for VANETs. *In Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, 35-42.
- McArthur, S. D. (2007). Multi-agent systems for power engineering applications—Part I: Concepts, approaches, and technical challenges. *IEEE Transactions on Power systems*, 1743-1752.
- Mirchandani, P., & Head, L. (2001). A real-time traffic signal control system: Architecture, algorithms, and analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 9*, 415-432.
- Movilidad, S. D. (2019). *Caracterización de la movilidad - Encuesta de Movilidad de Bogotá*. Bogotá D.C.
- Nacht, J., Falco, M., & Robiolo, G. (2018). Modelado y Simulación de una Intersección de Calles en un Contexto Multiagente. *Elektron: Ciencia y Tecnología en la Electrónica de Hoy.*, 83-94.
- Nakamura, F., & Yamazaki, K. (2014). Two statistical methods for grouping vehicles in traffic flow based on probabilistic cellular automata. *In Proceedings of the IEEE Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 15th Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS)*. Kitakyushu, Japan, 956-960.
- Nha, V., Djahel, S., & Muurphy, J. (2012). A comparative study of vehicles' routing algorithms for route planning in smart cities. *In Proceedings of the IEEE First International Workshop on Vehicular Traffic Management for Smart Cities (VTM)*. Dublin, Ireland., 1-6.
- OECD. (2002). ORGANIZACIÓN DE LA COOPERACIÓN Y DESARROLLO ECONÓMICO.
- Perez Mera, C., & Ramos Beltran, H. (2017). Aproximación al comportamiento vehicular en la intersección Av. NQS con Calle 8 sur en la ciudad de Bogotá.
- Reed, T. (2019). *INRIX Global Traffic Scorecard*.
- Riaz, F., & Niazi, M. A. (2017). Towards Social Autonomous Vehicles: Efficient Collision Avoidance Scheme Using Richardson's Arms Race Model. *PLoS ONE*, 12.
- Sörensen, K. &. (2013). Metaheuristics. *Encyclopedia of operations research and management science*. 960-970.
- TomTom International, B. (2021). *Bogota traffic*. Obtenido de https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/bogota-traffic/
- TomTom2023, I. (5 de March de 2023). *Bogotá Traffic, Colombia*. Obtenido de Bogotá Traffic, Colombia: <https://www.tomtom.com/traffic-index/bogota-traffic/>
- Urbana., S. D. (s.f.). Usos Permitidos Chicó Lago y El Refugio. *Plan de Ordenamiento Territorial*. Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Vamos, O. B. (2018). *Encuesta de Participación Ciudadana*. Bogotá.
- Vamos, O. B. (2019). *Interactivo: Localidades cómo vamos 2018. Localidad de Chapinero*. Obtenido de http://www.bogotacomovamos.org/interactivo-localidades-como-vamos-2018/?fbclid=IwAR3_t0Wvdm0ya76J_xa53HRVAibgzpZ3-nt-tdwzaBJzy5uxOZUTsQSM-dQ

- Velandia Lara, V. (2023). Propuesta de lineamientos de usos de la malla vial basado en el análisis espacial y simulación basada en agentes para la localidad de chapinero (UPZ El Refugio y Chicó Lago) en la ciudad de Bogotá. *Urban Studies Journal*.
- Velasquez M., C. V. (2015). *Tesis Doctoral: Espacio Publico y Movilidad Urbana: Sistemas Integrados de Transporte Masivo (SITM)*. Barcelona, España: Universidad de Barcelona, Facultad de Bellas Artes, Programa de Doctorado Espacio Público y Regeneración Urbana.
- Wilensky, U. (1999). *Netlogo*. Obtenido de Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
- Wu, J., D., G., Zhang, M., & N., C. (896-909). Delay-based traffic signal control for throughput optimality and fairness at an isolated intersection. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 67, 2017.
- Yuan, Y., & Wang, F.-Y. (2016). Towards blockchain-based intelligent transportation systems. *In Proceedings of the IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation systems (ITSC)*. Rio de Janeiro, Brazil., 2663-2668.

ANEXOS

A. ANEXO 1

Usos de acuerdo con el POT. Disponible en detalle en el Anexo 1. Fuente: Elaboración Propia en base a información oficial (Urbana.)

B. ANEXO 2

Usos Actuales de Primer Piso o Nivel. Fuente: Elaboración Propia.

C. ANEXO 3

Usos Actuales de Segundo Piso (Nivel) en adelante. Fuente: Elaboración Propia.

D. ANEXO 4

Usos generales de Entorno de la zona de Estudio. Fuente: Elaboración Propia.

E. ANEXO 5

Zonas verdes del área de Estudio. Fuente: Elaboración Propia

F. ANEXO 6

Altura promedio de Edificaciones por Manzana. Fuente: Elaboración Propia.

G. ANEXO 7

Parqueaderos y Estaciones de Transporte Público. Fuente: Elaboración Propia.

H. ANEXO 8

Caracterización de Vías. Fuente: Elaboración Propia.

I. ANEXO 9

Tráfico promedio de Lunes a Viernes en Hora Pico AM. Fuente: Elaboración Propia.

J. ANEXO 10

Tráfico promedio de Lunes a Viernes en Hora Pico PM. Fuente: Elaboración Propia.

K. ANEXO 11

Tráfico promedio de Lunes a Viernes en Hora Valle. Fuente: Elaboración Propia.

L. ANEXO 12

Tráfico promedio Fin de Semana Nocturno. Fuente: Elaboración Propia.

M. ANEXO 13

Tráfico promedio Fin de Semana Diurno. Fuente: Elaboración Propia.

N. ANEXO 14

Tratamiento de Datos para simulación. Fuente: Elaboración Propia basado en la información de (Movilidad, 2019) y (TomTom International, 2021)

O. ANEXO 15

Diagrama de Ciclos Causales detallado, ciudad de Bogotá. Fuente: (Franco, Méndez, & Espitia, 2015)

P. ANEXO 16

Bases de Datos detalladas con reportes de resultados de todas las simulaciones Base. Fuente: Elaboración Propia.

Q. ANEXO 17

Bases de Datos detalladas con reportes de resultados de todas las simulaciones Propuesta. Fuente: Elaboración Propia.