

Maestría en Ingeniería Civil

Análisis de la capacidad vial por efecto de paraderos en acera de los autobuses del sistema integrado de transporte público de Bogotá

Nelson Leonardo Acero Nitola

Bogotá, DC., 04 de octubre de 2021

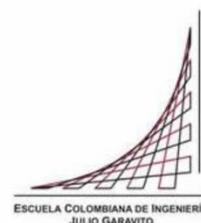


Análisis de la capacidad vial por efecto de paraderos en acera de los autobuses del sistema integrado de transporte público de Bogotá

Tesis Para Optar Al Título De Magíster En Ingeniería Civil, Con Énfasis En Tránsito Y Transporte

Dr. Carlos Felipe Urazán Bonells
Director

Bogotá, DC., 04 de octubre 2021



Nota de aceptación

El trabajo de grado “Análisis de la capacidad vial por efecto de paraderos en acera de los autobuses del sistema integrado de transporte público de Bogotá” presentado para optar por el título de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte, cumple con los requisitos establecidos y recibe nota aprobatoria.

Director de la tesis

PhD. Carlos Felipe Urazán Bonells

Jurado

MSc. Maritza Cecilia Villamizar

Jurado

MSc. Santiago Henao Pérez

Bogotá, DC., 04 de octubre de 2021

Dedicatoria

Porque somos hechura suya, creados en Cristo Jesús para buenas obras, las cuales Dios preparó de antemano para que anduviésemos en ellas.
Efesios 2:10.

Agradecimientos

Para el desarrollo de este proyecto se expresan agradecimientos a; mi familia por su apoyo incondicional; el ingeniero Carlos Urazán director de este trabajo, por el tiempo dedicado y la orientación prestada para su culminación; la ingeniera Maritza Villamizar en su gestión y contribución en programaciones para el uso de licencia académica de PTV Group como parte de la institución.

Resumen

Dentro de la movilidad en la ciudad de Bogotá, uno de los puntos de interés se centra en los niveles de congestión vehicular críticos en comparaciones a nivel mundial, produciendo de forma general y por los corredores mixtos de la ciudad un aumento de los tiempos de viaje y demoras en el Sistema de Transporte Público de Pasajeros. En esta investigación se estudia como los paraderos en acera del sistema en su interacción con los autobuses en servicio dentro de los corredores mixtos inciden sobre la capacidad vial, para lo cual, sobre un punto de la ciudad con alto tráfico de Rutas del SITP Urbano se realizan dos análisis del comportamiento del Paradero en acera anterior y posterior a una intersección semaforizada, revisando en sitio datos: fundamentales de la geometría de la zona, propios del tráfico del corredor por medio del cual se realizaron aforos, identificando los tiempos de fases de la señal de paso y exclusivos de los autobuses que presentan servicio en el paradero identificando Rutas, tipos de autobuses, tiempos de permanencia y módulos de parada. El proceso de análisis se ha realizado mediante la micro simulación con variaciones de Rutas y Volúmenes que permita identificar los efectos en los tiempos de viaje, capacidad y niveles de servicio por medio de las demoras totales y a través de puntos de control asignados en los corredores de interés.

Palabras clave: Capacidad vial, tiempo de permanencia, microsimulación, demora, transporte público.

Abstract

Within mobility in the city of Bogotá, one of the points of interest focuses on the critical levels of vehicular congestion in comparisons worldwide, producing in general and through the mixed corridors of the city an increase in travel times and delays in the public passenger transportation system. In this research, it is studied how the stops on the sidewalk of the system in their interaction with the buses in service within the mixed corridors affect the road capacity, for which, on a point of the city with high traffic of SITP Urban routes, perform two analyzes of the behavior of the Whereabouts on the sidewalk before and after a traffic light intersection, reviewing on site data: the fundamentals of the geometry of the area, typical of the traffic of the corridor through which counts were made, identifying the times of phases of the signal of passage and exclusive of the buses that present service in the whereabouts identifying routes, types of buses, time of permanence and modules of stop. The analysis process has been carried out by means of the micro simulation with variations of routes and volumes that allows to identify the effects on travel times, capacity and service levels through total delays and through assigned control points in the corridors of interest.

Keywords: road capacity, dwell time, microsimulation, delay, public transport

Índice general

Introducción.....	16
Metodología de la investigación.....	19
Justificación y planteamiento del problema.....	19
Objetivos.....	21
Objetivo general.....	21
Objetivos específicos.....	21
1. Marco teórico y estado del arte.....	22
1.1 Funcionamiento del SITP Urbano.....	22
1.1.1 Generalidades.....	22
1.1.2 Estado actual.....	23
1.1.3 Uso del servicio y legislación.....	26
1.1.4 Tarifas y pagos del sistema.....	27
1.2 Paraderos del SITP.....	28
1.3 Capacidad del Paradero.....	32
1.3.1 Tiempo de permanencia.....	33
1.3.1.1 Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y Transporte – Alcaldía Mayor de Bogotá.....	34
1.3.1.2 HIGHWAY CAPACITY MANUAL URBAN STREET SEGMENT (HCM 2010).....	34
1.3.1.3 Tiempos de permanencia en Bogotá según (Bautista, 2016).....	35
1.4 Capacidad vial.....	43

2.	INFORMACIÓN Y PROCESAMIENTO	51
2.1	Descripción de la zona	51
2.2	Configuración de paraderos.....	53
2.3	Servicio de Rutas.....	57
2.4	Aforos.....	59
2.4.1	Aforos del sistema de transporte publico SITP	61
2.4.2	Tiempos de permanencia	63
2.5	Procesamiento de datos	66
2.6	Modelo de micro simulación	66
2.6.1	Tipo de vehículos	67
2.6.2	Geometrización del modelo.....	68
2.6.3	Decisiones de enrutamiento.....	69
2.6.4	Volúmenes vehiculares.....	71
2.6.5	Ciclo semafórico.....	71
2.6.6	Implantación de paraderos.....	72
2.6.7	Líneas de transporte publico	72
2.6.8	Software de micro simulación	79
2.6.9	Calibración del modelo	80
3.	ANÁLISIS DE CAPACIDAD VIAL	81
3.1	Escenarios de variación.....	81

	10
3.1.1 Escenario 1 (base).....	81
3.1.2 Escenario 2.....	81
3.1.3 Escenario 3.....	82
3.1.4 Escenario 4.....	82
3.1.5 Escenario 5.....	82
3.1.6 Escenario 6.....	82
3.1.7 Escenario 7.....	83
3.1.8 Escenario 8.....	83
3.2 Análisis de Tiempos de Viaje.....	84
3.2.1 Paradero 242A01	86
3.2.2 Paradero 212.....	88
3.3 Análisis De Capacidad	92
3.4 Análisis De Niveles De Servicio.....	99
3.5 Escenario Mejorado	104
4. CONCLUSIONES.....	107
5. REFERENCIAS.....	111
6. ANEXOS	113

Índice de Tablas

Tabla 1. Concesionarios y flota de vehículos	24
Tabla 2. Índices de eficiencia	26

Tabla 3. Tiempos de permanencia mañana. Bautista, 2016.....	36
Tabla 4. Tiempos de permanencia tarde. Bautista, 2016.	37
Tabla 5. Resumen del estado del arte de investigación	48
Tabla 6. Rutas Paradero 242A01.....	57
Tabla 7. Rutas Paradero 212A00.....	58
Tabla 8. Rutas Paradero 212B00.....	58
Tabla 9. Rutas Paradero 212C00.....	58
Tabla 10. Volúmenes y composición vehicular Av. Calle 100 W-N.....	59
Tabla 11. Volumen y composición vehicular Av. Carrera 19 Norte	60
Tabla 12. Volúmenes y composición vehicular Av. Calle 100 suroccidental	60
Tabla 13. Aforo SITP paradero 242A01.....	61
Tabla 14. Aforo SITP paradero 212-00.....	62
Tabla 15. Tiempos de permanencia en segundos del paradero 242A01.....	63
Tabla 16. Tiempos de permanencia en segundos del paradero 212-00.....	64
Tabla 17. Flujo relativo Av. Carrera 19 Costado Norte	69
Tabla 18. Flujo relativo Av. Carrera 19 Costado Norte	70
Tabla 19. Flujo relativo Av. Calle 100 costado Oriental	71
Tabla 20. Grupo de Señal	72
Tabla 21. Tiempos de distribución - Rutas del Paradero 242A01 en segundos.....	76
Tabla 22. Tiempos de distribución- Rutas del Paradero 212 en segundos	77
Tabla 23. Horarios de Servicio – Rutas del Paradero 212	78
Tabla 24. Variación de los volúmenes de tráfico aplicado a cada escenario.....	81
Tabla 25. Variación de los volúmenes de tráfico aplicado a cada escenario.....	83
Tabla 26. Coordenadas Puntos de Control	84

Tabla 27. Tiempos de viaje Punto de Control A con variación de tráfico y numero de rutas.	86
Tabla 28. Crecimiento de los tiempos de viaje de todos los escenarios punto de control A	87
Tabla 29. Tiempos de viaje Punto de Control B1 con variación de tráfico y numero de rutas.....	88
Tabla 30. Tiempos de viaje Punto de Control B2 con variación de tráfico y numero de rutas.....	88
Tabla 31. Crecimiento de los tiempos de viaje de todos los escenarios punto de control B1	90
Tabla 32. Crecimiento de los tiempos de viaje de todos los escenarios punto de control B2	91
Tabla 33. Disminución de la capacidad en efecto de paradero 212 Punto de control B1	97
Tabla 34. Disminución de la capacidad en efecto de paradero 212 Punto de control B2	98
Tabla 35. Niveles de servicio para punto de control A	103
Tabla 36. Niveles de servicio para punto de control B1	103
Tabla 37. Niveles de servicio para punto de control B2	103

Índice de Figuras

Figura 1. Antigüedad de Vehículos SITP.....	23
Figura 2. Diferencia en la demanda del sistema	25
Figura 3. Disposición de la zona de espera ideal	29
Figura 4. Demarcación de la vía con ciclorruta tipo A.	30
Figura 5. Tipos de bandera para paraderos SITP	30
Figura 6. Concepto de paradero multimodal.....	31
Figura 7. Variabilidad del tiempo de permanencia sobre la capacidad del paradero	38
Figura 8. Tiempos de permanencia criticos sobre la capacidad del paradero.....	39
Figura 9. Paradas de autobús cercanas y lejanas en carriles exclusivos para autobuses	42
Figura 10. Acumulación y liberación en detenciones	44
Figura 11. Demora promedio de control respecto al aumento de volumen.....	45
Figura 12. Trazado de trayectorias con linea de parada.....	46
Figura 13. Fallo de ciclo.....	47
Figura 14. Operación sobresaturada	47
Figura 15. Zona de estudio.....	51
Figura 16. Calzada 1 – Sur Externa.....	52
Figura 17. Calzada 4 – Norte Externa.....	53
Figura 18. Ubicación Paradero 242A01 Br. Santa Bibiana	54
Figura 19. Ubicación Paradero 212 Br. Santa Bibiana.....	54
Figura 20. Dimensiones Paradero 242A01.....	55
Figura 21. Dimensiones Paradero 212A00.....	55
Figura 22. Dimensiones Paradero 212B00.....	56

Figura 23. Dimensiones Paradero 242C00.....	56
Figura 24. Volumen vehicular para Av. Calle 100 corredor Noroccidental.....	60
Figura 25. Volumen vehicular para Av. Calle 100 corredor Suroccidental	61
Figura 26. Ocupación del carril de zona de parada por trafico mixto.	65
Figura 27. Distribución de pasajeros en area del paradero	65
Figura 28. Proceso de modelado en transporte	67
Figura 29. Geometria del modelo	68
Figura 30. Decisión de enrutamiento de Av. Carrera 19 costado Norte.....	69
Figura 31. Decisión de enrutamiento de la Av. Calle 100 Costado Occidental.....	70
Figura 32. Decisión de enrutamiento de la Av. Calle 100 Costado Oriental	70
Figura 33. Tiempo fijo de Ciclo semaforicó.....	71
Figura 34. Enrutamiento Linea T62 y 291	73
Figura 35. SITP BUS 80	74
Figura 36. Modelo BUS 80.....	74
Figura 37. SITP Buseton 50 pasajeros – Buseteta 40 pasajeros	74
Figura 38. SITP Buseton 50 pasajeros – Buseteta 40 pasajeros	75
Figura 39. Modelo Estandar	75
Figura 40. Vista Noroccidental modelo PTV Vissim	79
Figura 41. Vista Oriental modelo PTV Vissim.....	79
Figura 42. Puntos de control para tiempos de viaje	84
Figura 43. Grafica Escenario 1 – BASE Puntos de Control A	85
Figura 44. Grafica Escenario 1 – BASE Puntos de Control B1	85
Figura 45. Grafica Escenario 1 – BASE Puntos de Control B2	85
Figura 46. Grafica de tiempos de viaje por escenarios y variacion de volumen de trafico PC-A..	87

Figura 47. Grafica de tiempos de viaje por escenarios y variacion de volumen de trafico PC-B1	89
Figura 48. Grafica de tiempos de viaje por escenarios y variacion de volumen de trafico PC-B2	89
Figura 49. Grafica de volúmenes generados por el modelo para escenario 1 en paradero 242A01	92
Figura 50. Grafica de volúmenes generados por el modelo para escenario1 en paradero 212 W-S	93
Figura 51. Grafica de volúmenes generados por el modelo para escenario 1 en paradero 212 W-E	93
Figura 52. Grafica de reduccion de vehiculos/hora para corredor en paso por paradero 242A01	94
Figura 53. Grafica de reduccion de vehiculos/hora para corredor en paso por paradero 212 W-E	95
Figura 54. Grafica de reduccion de vehiculos/hora para corredor en paso por paradero 212 W-E $v/c \approx 1$	96
Figura 55. Grafica de reduccion de vehiculos/hora para corredor en paso por paradero 212 W-S	97
Figura 56. Grafica de retraso de vehiculos en Paradero 242A01 Punto de Control A	100
Figura 57. Grafica de retraso de vehiculos en Paradero 212 Punto de Control B1	100
Figura 58. Grafica de retraso de vehiculos en Paradero 212 Punto de Control B2	101

Introducción

La congestión vehicular en la ciudad de Bogotá se ha mantenido como una de las más críticas en la categorial mundial, en los últimos 4 años se ha ubicado dentro de las 3 ciudades con mayores problemas en los niveles de congestión llegando al 68%. (TomTom, 2020).

Desde el año 2013 en el Plan Maestro de Movilidad, se estructuró el Sistema integrado de Transporte Público SITP, que permitiera de forma gradual cubrir el servicio de transporte público colectivo de la ciudad con una cobertura del 100%. Sin embargo, algunos problemas como: los retrasos en su implementación y las inversiones dedicadas a la movilidad, concibieron que el crecimiento de automóviles y motocicletas fuera mayor que la infraestructura que lo sostiene, creando así, un constante nivel de congestión en el tráfico mixto.

El funcionamiento del SITP con los servicios: urbano, alimentador, complementario y especial, forman alrededor de 300 rutas con 7mil paraderos en acera (MiRutaFacil, 2019). Aunque en algunos corredores se ha destinado asignar un carril exclusivo para la movilización de estos autobuses muchos otros corredores comparten por igual el perfil vial, creando un corredor mixto en el que todos los vehículos tienen que enfrentar las detenciones de las rutas del SITP de acuerdo a cada paradero.

De tal manera, el presente documento pretende analizar como dichas detenciones en paraderos en acera son un factor que intervienen en el aumento de la congestión vehicular y retrasos de las mismas rutas, teniendo como base que los viajes en autos particulares sigue en tendencia con un crecimiento importante independientemente de la incorporación del SITP.

Uno de los puntos más importantes en el análisis es para aquellos corredores en el que coinciden muchas rutas especialmente del SITP Urbano, en donde un paradero con diferentes módulos tiene que recibir en hora pico más de 130 autobuses sobre un corredor mixto con tráfico medio y alto. Cuando se trata de un corredor con un gran centro de origen y destino de pasajeros en una zona industrial, comercial,

académica, ejecutiva o mixta, el número de paradas se incrementa tanto para abordaje o descenso, y cuando se trata de una hora de alta demanda de pasajeros las detenciones en el paradero suelen llevar tiempos de permanencia más altos. Esta disposición en paraderos que se encuentran cerca de intersecciones semaforizadas forma una secuencia de detenciones que elevan los tiempos de viaje del tráfico mixto y de autobuses del sistema que llegan a presentar estados de espera en cola para presentar servicio en dicho paradero.

En este trabajo se evalúa en una primera fase un sector con condiciones similares a estas, donde al menos 20 rutas del SITP urbano presentan servicio en un paradero sencillo o con múltiples módulos. Se revisa en proximidad con intersecciones semaforizadas y en horas de alta demanda del sistema y de tráfico en el sector.

En una segunda fase se realiza una recolección de información existente sobre: volúmenes, rutas asignadas, flota en operación, tiempos de servicio y demanda del sistema. Igualmente, información tomada directamente en la zona de estudio como: medidas de la infraestructura vial, volúmenes vehiculares, composición vehicular, rutas activas en paradero, tiempos de permanencia e información de la intersección más próxima.

Con esta información procesada, en la tercera fase se realiza un modelo de micro simulación incorporando; todos los elementos de la geometría del perfil vial y corredor, paraderos con sus módulos, rutas y número de paradas, volúmenes de tráfico, asignación y distribución en el corredor. Así mismo incorporando datos de composiciones vehiculares, tiempos de permanencia, tipos de vehículos y configuración de la intersección semafórica. El software a utilizar para realizar el modelo de micro simulación es PTV Vissim versión 2021, que permite incorporar y configurar todos los parámetros necesarios para dicho análisis, modela y simula todas las intervenciones operativas y evalúa su interacción sobre el flujo vial. (PTV Vissim, 2021)

En la cuarta y última fase se realizará un análisis de capacidad e identificación de los factores óptimos de flujo, en el cual se pueda determinar los volúmenes apropiados de acuerdo a las condiciones del paradero y sus detenciones. Para lograr esto, se agrega progresivamente las rutas en el modelo de micro simulación manteniendo los volúmenes de tráfico actuales y luego realizando variaciones con los volúmenes de tráfico sin cambiar su composición vehicular. El análisis de cada una de estas evaluaciones está enfocadas a los tiempos de viaje en un corredor entre 300m a 500m, la demora promedio en detención por vehículo, las longitudes de cola y los niveles de servicio.

Metodología de la investigación

El proceso metodológico se desarrolla con la obtención de una serie de información inicial, que permita establecer un caso de estudio que atienda una situación representativa para la investigación y una información fundamental asociada a la infraestructura vial, el tránsito y del funcionamiento del sistema integrado de transporte público de pasajeros de acuerdo a la base anteriormente establecida.

Esta información inicial es un proceso de consulta con las bases de datos del SITP gestionadas por Transmilenio S.A. revisando corredores y paraderos con una alta demanda de usuarios, así como de rutas y autobuses que presentan servicio. La información fundamental es aquella que debe ser medible y adquirida directamente en el sector de estudio para posteriormente ser procesada para su uso en el modelo de micro simulación.

A través del software para modelación y simulación de tráfico PTV Vissim se evalúa el comportamiento de los autobuses en los paraderos en acera incorporando toda la información fundamental procesada. Con este modelo se trabaja para revisar y analizar la interacción de las detenciones de los autobuses del sistema en interacción con todo el tráfico mixto sobre el corredor.

Justificación y planteamiento del problema

En los últimos 5 años en la ciudad de Bogotá, el parque automotor de automóviles ha crecido un 24%, el de las camionetas un 62% y el de las motos, un 23%. En contraste, los vehículos para servicio público apenas han crecido un 2%. Esta situación puede representar que los objetivos del plan maestro de movilidad no se cumplieron. Uno de los puntos importantes era crear un sistema de transporte público que permitiera desestimular el uso del transporte privado, así como otras inversiones que permitieran estimular el uso de la bicicleta y la caminata. (Restrepo, 2019).

Como resultado los problemas de congestión vial van a seguir empeorando, aumentando los tiempos de viaje en los desplazamientos del transporte privado, así como los usuarios del sistema de transporte público de pasajeros urbano, donde se ha evidenciado demoras de hasta 45 minutos en el servicio de rutas y se ha identificado que cuatro zonas mantienen un incumplimiento por encima del 35% así como demorados recorridos en los viajes de los usuarios, (ALBARRACÍN, 2019).

Debido a que los autobuses del SITP transitan en los corredores viales de la ciudad formando el tráfico mixto, se ven implicados en la congestión vehicular que pueda presentarse durante la jornada. La accidentalidad, deterioro de la infraestructura, conductas del usuario o aumento del parque automotor son factores que inciden en el aumento de los tiempos de viaje. Ahora un factor para este estudio son las detenciones del sistema de transporte público y como están afectando los tiempos de recorrido en las rutas del sistema. Según (BIAN, 2015) las detenciones de los autobuses con largos tiempos de abordaje de pasajeros afectan los tiempos de autobuses formando una cola de espera.

Teniendo en cuenta estas situaciones, así como el objeto de este trabajo surge la pregunta de investigación, ¿Cómo se ve afectada la capacidad vial por efecto de los paraderos en acera? Para el caso de la ciudad de Bogotá, este efecto puede llegar a ser bien particular porque existen paraderos con una gran cantidad de rutas asignadas una condición que puede ser desfavorable para: los usuarios en el paradero que suelen tener esperas importantes, las rutas que presentan servicio debido a que se pueden ver escenarios de autobuses esperando en cola para permitir el ascenso y descenso de pasajeros, la ocupación de los carriles reduciendo el flujo vial, el aumento de los tiempos de viaje del tráfico mixto y la interacción y combinación de estos escenarios en efecto de una intersección cercana.

Objetivos

Objetivo general

Analizar la afectación de la capacidad vial como efecto de las paradas de autobús en paraderos sobre acera a partir del tiempo de permanencia, número de rutas asignadas y formaciones de autobuses en cola sobre el primer carril.

Objetivos específicos

1. Identificar la información de tránsito en el sector del corredor en estudio.
2. Evaluar el comportamiento de la operación de los paraderos seleccionados.
3. Plantear un escenario óptimo generando condiciones ideales para que la capacidad vehicular posea la menor afectación posible.

1. Marco teórico y estado del arte

En este apartado se pretende registrar las generalidades actuales en cuanto al funcionamiento del sistema de transporte público de Bogotá en referencia con la congestión vehicular del tráfico que se presenta en sus corredores, revisando la infraestructura del mismo, así como otros estudios realizados bajo las mismas modalidades.

1.1 Funcionamiento del SITP Urbano

1.1.1 Generalidades

Establecida la estructuración del nuevo Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá (SITP) en marco del Plan Maestro De Movilidad a partir de una implementación gradual y controlada con el propósito de que un solo sistema ofrezca las combinaciones necesarias para que un usuario llegue a su lugar de destino (Transmilenio, 2019).

El ideal es lograr una cobertura del 100% en la prestación del servicio integrando la operación y la tarifa, equilibrando la demanda de buses en todas las zonas asignadas. Adquiriendo tecnología para la flota actual de manera que puedan ayudar a reducir los índices de accidentalidad y mejorando la accesibilidad.

Así mismo uno de los objetivos en la transformación del sistema de transporte público de Bogotá es poder eliminar viajes en autos particulares permitiendo mejorar los índices de congestión. Igualmente mejorando estándares ambientales en la reducción de la emisión de gases contaminantes, realizar una organización de las rutas y paraderos para un transporte publico ordenado y otros aspectos en condiciones de productividad como: optimizar viajes, generar empleo y la posibilidad de moverse por distintos modos de transporte.

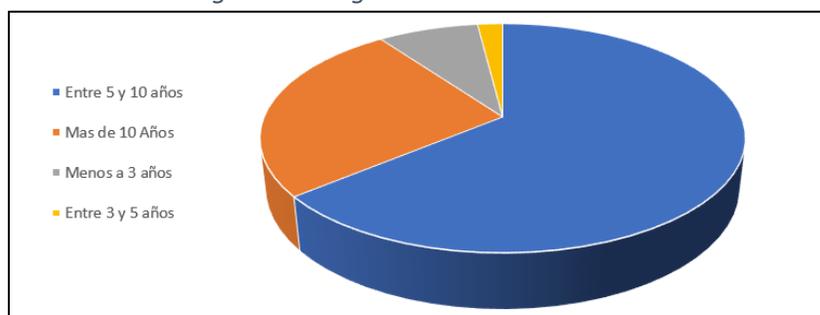
1.1.2 Estado actual

Actualmente el SITP posee una cobertura de 1.9 millones de kilómetros distribuidos en 13 zonas de operación con un operador de recaudo, para esta distribución se reparten en 282 rutas para las cuales son necesarios 13mil conductores.

La flota vinculada en estado activo varia en menor medida mes a mes. Esta flota está controlada inicialmente por los concesionarios que la operan: Consorcio Express, Este mi Bus, ETIB, GMOVIL, Masivo Capital, Suma, Tranzit. Cada uno atiende una o varias zonas dentro de las que se encuentra: San Cristóbal, Usaquén, Calle 80, Tintal zona franca, Bosa, Engativá, Kennedy, Suba oriental, Ciudad Bolívar y Usme (Tabla 1).

Así mismo existen pequeñas variaciones según se van presentado adquisiciones de nuevos vehículos para el sistema (Figura 1), en general las edades de todos los vehículos son las siguientes: (Transmilenio, 2019).

Figura 1. Antigüedad de Vehículos SITP



Fuente: Transmilenio, 2019

La flota de autobuses depende de los estudios de demanda asignados a cada zona, distribuidos de acuerdo a la ruta asignada y así mismo un tamaño de vehículo acorde a la misma. En la siguiente tabla se presenta un resumen del concesionario, y el número de vehículos de acuerdo a las zonas que opera separado de acuerdo al tamaño del autobús.

Estos informes corresponden a una serie de estadísticas generadas bimestralmente por la

Subgerencia Técnica y de Servicios a partir de información primaria y secundaria aportada por las direcciones técnicas de BR, Buses, Modos alternativos y la Subgerencia Económica de la entidad, el cual tiene como propósito proveer un informe periódico del estado actual y seguimiento a la oferta y la demanda del Sistema Integrado de Transporte Público SITP.

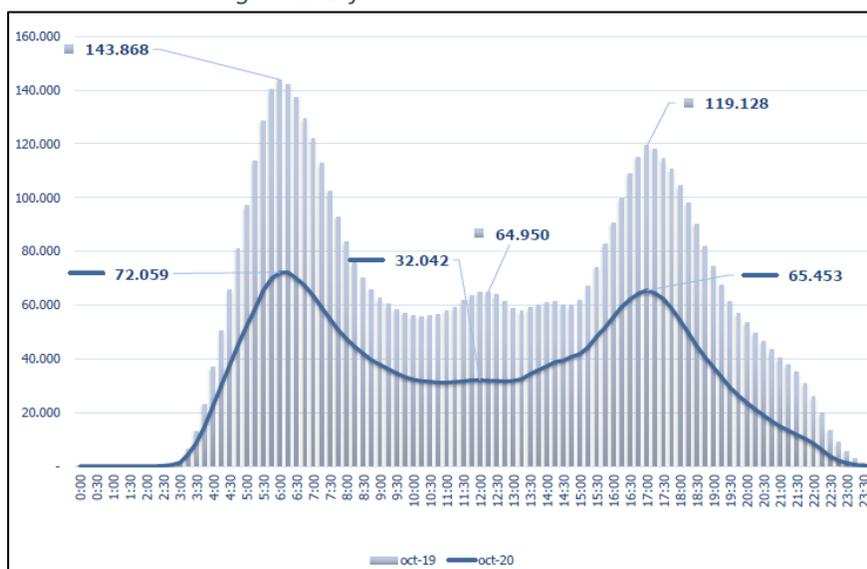
Tabla 1. Concesionarios y flota de vehículos

Concesionario	Bus 19	Bus 40	Bus 50	Bus 80	Total, Concesionarios
CONSORCIO EXPRESS	41	329	812	317	1499
San Cristóbal	13	52	288	68	421
Usaquén	28	277	524	249	1078
ENTE ES MI BUS	32	95	192	179	498
Calle 80	17	53	161	114	345
Tintal zona franca	15	42	31	65	153
ETIN	95	72	796	307	1270
Bosa	95	72	796	307	1270
GMOVIL	60	143	379	90	672
Engativá	60	143	379	90	672
MASIVO CAPITAL	2	195	476	495	1168
Kennedy	1	111	304	366	782
Suba oriental	1	84	172	129	386
SUMA	57	97	119	354	627
Ciudad Bolívar	57	97	119	354	627
TRANZIT	0	0	0	0	0
Usme	0	0	0	0	0
Total General	287	931	2774	1742	5734

Fuente: (Transmilenio, 2020)

Es importante tener en cuenta, que aunque se presenta un total de 5734 Autobuses en servicio, los cuales tuvieron crecimiento durante los últimos dos años, los niveles de la demanda tuvieron variaciones importantes debido a la pandemia generada por la enfermedad del coronavirus (COVID19), con lo cual, los viajes generados desde el sector académico, ejecutivo, empresarial y comercial se redujeron sustancialmente, (Transmilenio, 2020) presenta un valor de 20,523,249 abordajes en el sistema zonal, de acuerdo a información generada un año atrás existen reducciones del 52.6% en todo el sistema. En la siguiente grafica podemos ver el perfil de demanda en un día típico (Figura 2).

Figura 2. Diferencia en la demanda del sistema



Fuente: (Transmilenio, 2020)

Aunque existe una reducción marcada en la demanda de las rutas, el número de vehículos activos se mantuvo con un pequeño crecimiento, lo que se notó en la ciudad con un transporte público de pasajeros más desocupado. Así mismo presenta una reducción uniforme con respecto al horario, donde existen las mismas zonas marcadas para horas pico y horas valle.

Estos valores son corroborados por los índices de eficiencia del sistema entregados un mes antes de los diferentes aislamientos presentados en la ciudad por presencia de la pandemia, con los entregados dos meses después de que se cambió el aislamiento preventivo obligatorio por la fase de aislamiento selectivo donde la ciudad tuvo más libertad en la movilización.

En la Tabla 2 se muestra una comparativa de los índices de eficiencia para el mes de febrero y octubre del 2020. El primero de estos, el IPK nos muestra la reducción de la demanda marcada alrededor del 50% dando como resultado los pasajeros transportados de acuerdo a los kilómetros recorridos, lo que confirma una flota activa con pequeñas variaciones y la demanda reducida.

El IPG nos muestra los pasajeros transportados respecto a la flota promedio en operación, un índice que nuevamente nos muestra la reducción de pasajeros que usaron el sistema en el mes de febrero respecto de octubre con una flota con un pequeño crecimiento.

Y finalmente el IKB que nos muestra los kilómetros recorridos respecto a la flota promedio en operación, este índice es muy utilizado para revisar tanto la eficiencia como la inactividad por problemas técnico mecánicos o accidentalidad que reducen las longitudes totales de recorrido a lograr.

Tabla 2. Índices de eficiencia

	IPK	IPG	IKB
FEBRERO DE 2020	1.56	284	181
OCTUBRE DE 2020	0.73	150	206

Fuente: (Transmilenio, 2020)

Dentro de otras generalidades y funcionamiento del SITP, es importante mencionar que, dentro del sistema de acuerdo a las zonas y rutas conformadas, existen modificaciones tanto de los recorridos por cierres de vía debido a obras de infraestructura o redes, así como eliminación o creación de nuevas rutas. Para este procedimiento generalmente se avisa a los usuarios por medio de aplicaciones móviles y página oficial de Transmilenio sobre la operación o eliminación de alguna ruta con una anticipación promedio de 15 días, así como el anuncio de una nueva ruta.

Esta información se presenta en los aplicativos web y móvil de Google Transit y Moovit con el desplegable indicando: el número de servicio urbano, la tabla de ruta, el mapa de recorrido y los paraderos en los que presenta servicio indicando dirección y código del paradero.

1.1.3 Uso del servicio y legislación

Para hacer uso del sistema, en el Marco normativo del Código Nacional de Policía y Convivencia y Mediante la Ley 1801 de 29 de julio de 2016 se expidió el Código Nacional de Policía y Convivencia, cuyo Título XV “De la libertad de movilidad y circulación”, contiene en su Capítulo III Convivencia en los Sistemas de Transporte Motorizados y el artículo 146 Comportamientos contrarios a la convivencia en los sistemas de transporte motorizados o servicio público de transporte masivo de pasajeros.

TRANSMILENIO S.A. proporciono la actualización del Manual del usuario del sistema Transmilenio a su segunda versión con fecha de julio de 2020, en donde su implementación a partir de la formalización del documento, la oficina asesora de Planeación de TRANSMILENIO S.A. actualizo el Manual de Procedimientos y realizo la publicación en la Intranet y página web de la entidad. El presente Manual del Usuario del Sistema Transmilenio y en especial los derechos y deberes de los usuarios serán contenidos de divulgación institucional ampliamente difundidos entre la ciudadanía y en especial entre los usuarios del SITP, con carácter pedagógico y ánimo permanente en estaciones portales y paraderos del Sistema.

1.1.4 Tarifas y pagos del sistema

En general los pagos para validación y uso del sistema se encuentran en las estaciones, portales y en el caso del SITP en los torniquetes de los buses. Para el ingreso se debe adquirir y recargar la tarjeta unificada para todo el sistema Transmilenio TULLAVE, la cual a la hora de la validación descuenta el valor del pasaje de cada servicio que se utilice.

Las tarifas se modifican con una regularidad anual, actualmente la tarjeta tiene un costo de \$6000 pesos y los pasajes en \$2500 y \$2300 pesos para Transmilenio y servicio urbano respectivamente. Adicionalmente el Sistema Integrado de Transporte Público da el beneficio de realizar transbordos utilizando una tarifa integrada con la tarjeta personalizada, entre servicios troncales a urbanos sin costo adicional y entre servicio Urbanos a Troncales con un costo de \$200 pesos. Esta condición aplica dentro de una ventana de tiempo de 110 minutos que se cuenta a partir de la primera validación y donde se puede realizar hasta dos transbordos en un mismo viaje, además los transbordos no aplican para los servicios duales ni para dos transbordos tipo troncal – zonal – troncal (Transmilenio, 2020)

El sistema cuenta con unas tarifas preferenciales para: adultos mayores, personas con discapacidad y usuarios con la tarjeta incentivo Sisbén.

1.2 Paraderos del SITP

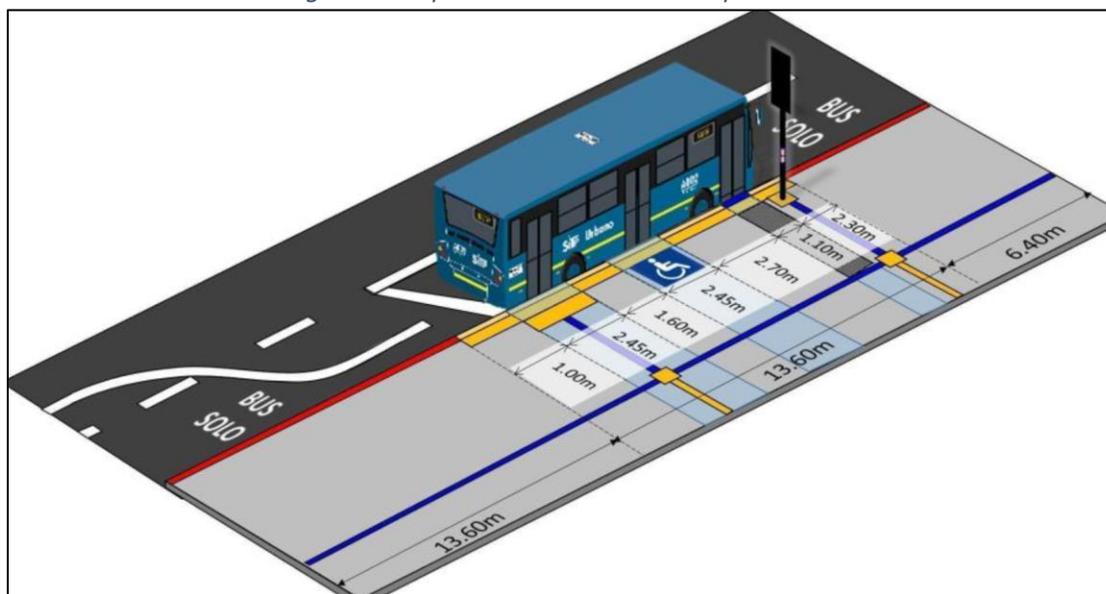
Parte de la infraestructura del SITP está compuesto por los paraderos en los que las rutas presentan el servicio. Los paraderos ejercen una influencia considerable en la operación del sistema, la cantidad de estos asignados a una ruta y la ubicación afectan principalmente las siguientes variables (Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C., 2005):

- Tiempos de Viaje
- Capacidad de la línea
- Número de unidades de transporte que pueden funcionar
- Costos de operación
- Conveniencia para el usuario de acuerdo con la distancia y el tiempo que necesita para llegar a ellos
- Marca en el medio ambiente
- Impacto en el transito general

Los paraderos del SITP están estratégicamente ubicados en diferentes puntos de la ciudad y son los únicos autorizados en donde los autobuses del sistema pueden detenerse para presentar el servicio.

La secretaria de movilidad ha publicado la nueva resolución 269 de 2020, por medio de la cual se modifica la Resolución 264 de 2015 y se dictan otras disposiciones, donde se presenta los criterios mínimos a tener en cuenta para la ubicación de los paraderos y adecuación de las zonas de espera de las diferentes modalidades de paraderos existentes y proyectados del SITP (Figura 3), así mismo se plantean los lineamientos respecto al mobiliario y señalización que se deben implementar en estos sitios con el fin de generar accesibilidad, seguridad y protección a los usuarios de transporte público (ALVARADO, 2020).

Figura 3. Disposición de la zona de espera ideal

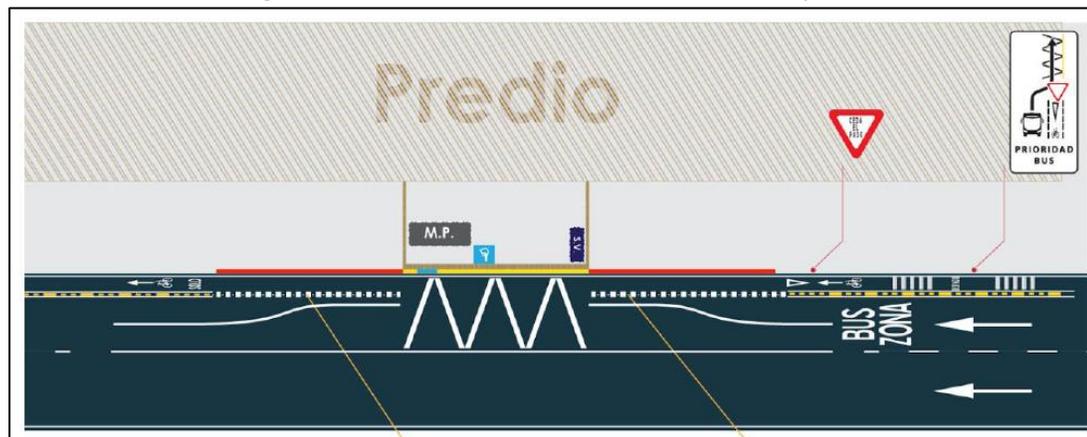


Fuente: (ALVARADO, 2020)

Esta nueva resolución aporta un documento más completo y detallado de los aspectos técnicos y de servicio en los paraderos, atendiendo igualmente los temas de: señalización, composición de la zona de espera, dimensiones y pasos peatonales expuesto en la resolución 264 de 2015 con algunas modificaciones y agregando aspectos en la implementación de herramientas tecnológicas, disposiciones hidráulicas, cambios en el mobiliario urbano, separación de las zonas en franjas de circulación, espera y seguridad así como disposiciones para los usuarios con movilidad reducida.

Para la intervención sobre el carril de parada del autobús los cambios son mínimos en cuanto a la demarcación, en donde se agregan algunas disposiciones en caso de que el corredor vial tenga un carril de ciclo vía adyacente o compartido con el carril del autobús. En la Figura 4 se muestra el esquema típico para esta nueva incorporación.

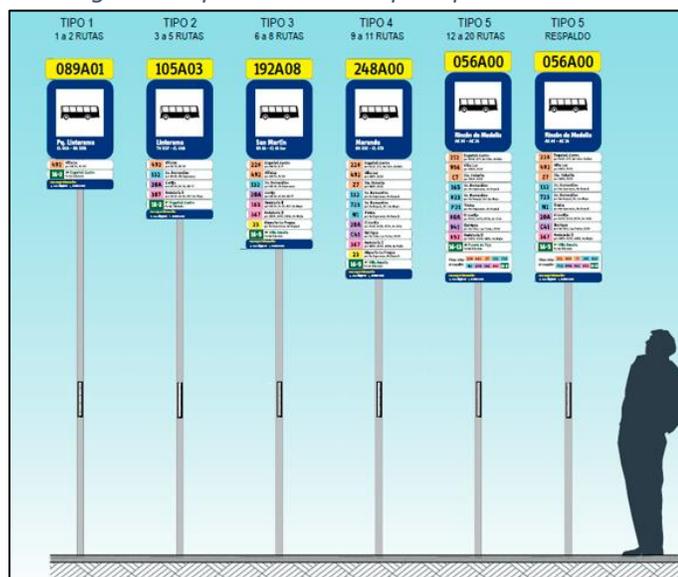
Figura 4. Demarcación de la vía con ciclorruta tipo A.



Fuente: (ALVARADO, 2020)

Entre tanto los paraderos aun no modificados o actualizados mantienen las disposiciones dadas en la resolución 264 de 2015, y que se encuentran actualmente en la zona de estudio que hace parte de este trabajo. Se mantiene el paradero M-10 según lo dispuesto en la cartilla de mobiliario urbano de Bogotá, compuesto igualmente por la bandera, que son señales verticales instaladas junto con el paradero con retro reflectividad, existen 6 tipos de acuerdo a la cantidad de rutas que prestan servicio (Secretaria Distrital de Movilidad, 2015). En la Figura 5 se presenta la característica de las mismas.

Figura 5. Tipos de bandera para paraderos SITP



Fuente: (Secretaria Distrital de Movilidad, 2015)

Sobre la misma estructura en la parte superior se encuentra la cenefa y contiene el código del paradero, este código es bien importante ya que es usado internamente por los operadores y conductores del sistema, así como para la identificación espacio en los diferentes aplicativos webs.

Bajo la cenefa se encuentra la señal y nombre del paradero, en una sección de 50x60 se marca la dirección de la intersección más cercana y un nombre que identifique el paradero de acuerdo a un hito de interés como centros comerciales, centros de salud, administrativos, deporte o puntos estratégicos en la ciudad.

Finalmente, bajo la señal y el nombre se encuentran el módulo de rutas del SITP urbano, alimentados y complementario que paran en el paradero. Se encuentran ordenadas iniciando con el servicio urbano, colores y orden alfabético.

Existen paraderos que en corredores de gran demanda fue necesario implementar varios módulos de parada con el propósito de distribuir esta demanda y mantener la capacidad equitativa entre todos los módulos. Cada módulo contiene mínimo la bandera y la demarcación, esta última incluye el sardinel amarillo junto en la parada del autobús como la demarcación del carril en la zona del paradero. En la Figura 6 se presenta el concepto del paradero multimodal.

Figura 6. Concepto de paradero multimodal



Fuente: (Secretaria Distrital de Movilidad, 2015)

La infraestructura del paradero tiene gran influencia en la expectativa y experiencia de los usuarios a la hora del uso del sistema, estudios como el de (Basu, Roy, Maitra, & Majumdar, 2020) mediante un análisis de factores exploratorios (EFA) verifican que 7 factores son los más esenciales para los usuarios:

- El área de parada del autobús
- La ubicación del paradero
- El camino de acceso
- La señalización horizontal, vertical e informativa de servicio.
- La seguridad en las paradas
- La iluminación
- La comodidad

Enfocados en el paradero, estos factores ofrecen una especial atención en el aumento del uso de transporte público, así como una reducción en los tiempos de espera de los autobuses ya que permite una mejor organización.

1.3 Capacidad del Paradero

Los principales elementos que determinan la capacidad del área del paradero son el tiempo de permanencia, la variabilidad del tiempo de permanencia, la coordinación de semáforos, la tasa de fallas y el tiempo de autorización.

Sin embargo, existen otros factores externos que dependiendo de su condición pueden favorecer o perjudicar la capacidad del paradero, según (AlRukaibi & AlKheder, 2018) la infraestructura vial en la calidad de la capa de rodadura número y anchos de carriles que en general puede verse reflejado en todo el corredor vial; las rutas en los recorridos especialmente en temas de frecuencia y asignación, puesto que se notaron rutas demasiado similares sobre algunos corredores; la posición geográfica de los paraderos

así como la distancia entre los mismos y finalmente el alto uso del transporte privado formando mayores volúmenes vehiculares aumentando la congestión en la ciudad y algunos análisis en la calidad del aire.

Por otra parte, en lo desarrollado por (Shatnawi, Al-Omarib, & Al-Qudahb, 2020) haciendo uso del famoso algoritmo Vehicle Routing Problem (VRP), el optimizador por enjambre de partículas PSO y el sistema de información geográfica GIS, se crearon tres modelos para resolver un problema general en Amman con los tiempos de viaje y la accesibilidad de los autobuses del sistema de transporte público. En este logro fue necesario realizar un rediseño de la ubicación y distancias entre paraderos según las iteraciones de los modelos, con el propósito de reducir al máximo en algunos corredores los tiempos de viaje y en otros aumentar la accesibilidad.

En casos globales se espera reducir los tiempos de viaje con paradas reiteradas en intervalos irregulares teniendo en cuenta que es necesario en los paraderos aumentar las áreas de servicio, así como la demanda de transporte público. En otros casos donde la accesibilidad es insuficiente se espera que los tiempos de viaje aumenten significativamente, sin embargo, existe una compensación de estos tiempos teniendo en cuenta el recorrido en caminata de los usuarios. Este estudio recomienda que se establezca la base de datos completa que contiene todos los parámetros requeridos de las paradas de autobús para mejorar la precisión de los modelos desarrollados puesto que los tiempos de viaje igualmente se pueden ver perjudicados por la capacidad de servicio que pueda ofrecer cada paradero.

1.3.1 Tiempo de permanencia

Existen 3 metodologías para estimar los tiempos de permanencia según (TCRP, 2013).

1. Mediciones de campo: son las mejores para evaluar sobre una ruta existente.
2. Valores predeterminados: adecuados para la planificación futura cuando no se disponga de estimaciones fiables de los volúmenes futuros de embarque y desembarque de pasajeros.

3. Cálculo: adecuado para estimar los tiempos de permanencia cuando los recuentos o estimaciones de embarque y desembarque de pasajeros están disponibles.

1.3.1.1 Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y Transporte – Alcaldía Mayor de Bogotá.

Este manual define el tiempo de permanencia como el tiempo que se tarda en trasladar a los pasajeros del paradero al autobús, el tiempo específico depende del número de usuarios que suben y bajan del autobús en la parada, que se expresa como:

$$\text{Subidas/bajadas sucesivas: } B0 + (B1Pb + B2PS)$$

$$\text{Subidas/bajadas simultáneas: } B0 + \max (B1Pb + B2PS)$$

Donde:

$B0$ =Tiempo muerto por detención (abrir o cerrar puertas) seg

$B1$ =Tiempo marginal de subida por pasajero seg/pax

$B2$ =Tiempo marginal de bajada por pasajero seg/pax Ps =Número de pasajeros que suben al bus Pb =Número de pasajeros que bajan del bus

1.3.1.2 HIGHWAY CAPACITY MANUAL URBAN STREET SEGMENT (HCM 2016)

Este manual define el tiempo de permanencia como la representación del tiempo que el vehículo de tránsito se detiene en la acera para atender los movimientos de los pasajeros, incluido el tiempo necesario para abrir y cerrar las puertas. No incluye el tiempo que se detuvo después de que terminaron los movimientos de los pasajeros (por ejemplo, esperando una señal de tráfico o esperando un espacio en el tráfico para volver a ingresar al carril de circulación) para casos de paraderos con bahía o paso al carril adyacente para adelantamiento. Los tiempos de permanencia suelen oscilar entre 10 y 60 s, según la demanda de embarque y desembarque (HCM, 2016).

HCM recomienda medir el tiempo de permanencia en el sitio, que es más adecuado para determinar la capacidad y el nivel de servicio de las rutas existentes. También recomienda el tiempo de permanencia basado en los siguientes supuestos cuando hay ausencia de datos.

- Distritos comerciales: 60 segundos
- Puntos de transferencia importantes: 30 segundos
- Paradas típicas: 15 segundos

Para calcular el tiempo de permanencia recomienda usar la siguiente ecuación:

$$T_d = P_a T_a + P_b T_b + T_{oc}$$

Donde:

T_d=Tiempo de permanencia en la parada del bus (seg)

P_a=Pasajeros que ascienden al bus por la puerta de más alta ocupación

T_a=Tiempo de servicio de ascenso (s/p)

P_b=Pasajeros que descienden al bus por la puerta de más baja ocupación

T_b=Tiempo de descenso de pasajeros (s/p)

T_{oc}=Tiempo de apertura y tiempo de cierre de puertas (seg)

Aclarando que este modelo considera que el ascenso de pasajeros ocurre de forma posterior al descenso, lo cual puede ocurrir en vehículos de una sola puerta o en aquellos en que sus puertas son usadas de forma indiferente para el ascenso y descenso de pasajeros.

Para obtener un tiempo de permanencia teniendo en cuenta la apertura de puertas de manera simultánea, se debe elegir el máximo de los tiempos entre el ascenso y descenso de pasajeros.

1.3.1.3 Tiempos de permanencia en Bogotá según (Bautista, 2016)

En esta tesis se realiza un análisis del tiempo de permanencia en parada de los buses del sistema integrado de transporte público de Bogotá en la Calle 72 Entre Carrera 68 y Avenida Boyacá.

A continuación, se detallan las fórmulas usadas para el cálculo del tiempo de permanencia en parada, adaptándolas a las condiciones específicas de la ciudad de Bogotá y a la información obtenida en campo.

$$TP=MAX (T_{od} + T_a + T_{cd}; T_{ot} + T_d + T_{ct})$$

TP =Tiempo de permanencia en parada (seg)

T_{od} =Tiempo de apertura puerta delantera (seg)

T_a =Tiempo de ascenso total de los pasajeros (seg)

T_{cd} =Tiempo de cierre puerta delantera (seg)

T_{ot} =Tiempo de apertura puerta trasera (seg)

T_d =Tiempo de descenso total de pasajeros (seg)

T_{ct} =Tiempo de cierre puerta trasera (seg)

Tabla 3. Tiempos de permanencia mañana. Bautista, 2016.

Mañana	Buseton	Microbús	Bus	TPC
Tiempo (s)	7.42	5.88	14.65	11.12
Mínimo	1	2	6	3
Mediana	6	6	7	6
Máximo	18	13	10	43
Desv. Est	3.69	2.72	1.59	10.17

Fuente: (Bautista, 2016)

Los resultados de tiempos de permanencia determinados en campo para el horario de la mañana tienden a ser bastante cortos, estos obviamente están directamente relacionados con el número de usuarios que presentan servicio siendo respectivamente menor en el mañana.

Tabla 4. Tiempos de permanencia tarde. Bautista, 2016.

Tarde	Buseton	Microbús	Bus	TPC
Tiempo (s)	14.48	15.34	14.65	9.74
Mínimo	3	4	5	1
Mediana	12	12	13	8
Máximo	58	42	33	29
Desv. Est	9.16	9.84	7.44	6.51

Fuente: (Bautista, 2016)

Consecuente los tiempos en horarios de la tarde por los usuarios en servicio es mayor. Estos tiempos de permanencia son una primera aproximación de datos cuantitativos que se pueden encontrar en el sistema de transporte público de pasajeros en Bogotá relacionando su efectividad y su relación proporcional entre el tiempo y los usuarios en servicio.

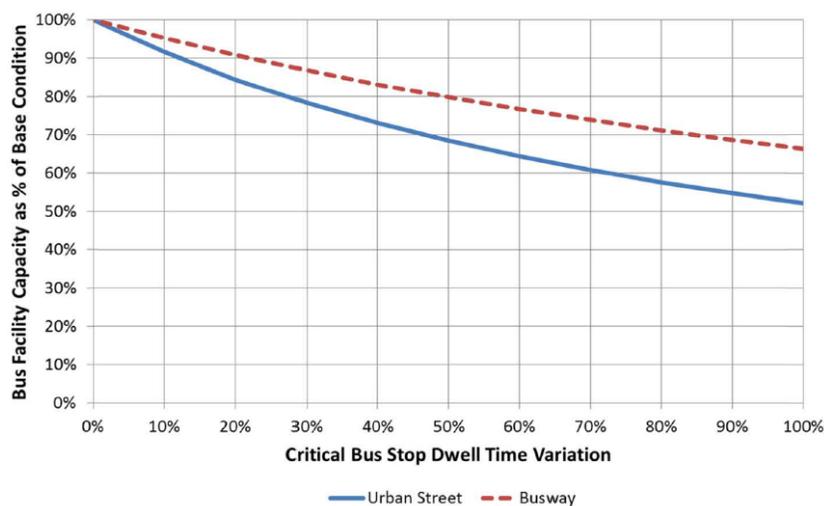
1.3.2 Variabilidad del tiempo de permanencia

La variabilidad del tiempo de permanencia explica el hecho de que los autobuses no se detienen durante la misma cantidad de tiempo en una parada debido a las fluctuaciones en la demanda de autobuses y rutas por parte de los pasajeros (HCM, 2016).

Este llega a ser un ítem fundamental en el análisis de la capacidad de paraderos de autobuses. La variabilidad del tiempo de permanencia se reconoce como: la desviación estándar del tiempo de permanencia dividido por el promedio del tiempo de permanencia. En la Figura 7 se puede ver el impacto de la variabilidad del tiempo de permanencia sobre la capacidad del paradero (TCRP, 2013).

Si bien la condición base está dada para un tiempo de permanencia promedio de 30 segundos, sin señales de tráfico o una fase en verde del 40% en un corredor urbano y un tiempo de autorización de 10 segundos. A medida que la variabilidad del tiempo de permanencia de los autobuses aumenta, disminuye la capacidad del paradero. Esto se aprecia más fuerte para calles urbanas que en carriles exclusivos de autobuses (TCRP, 2013) (Figura 7).

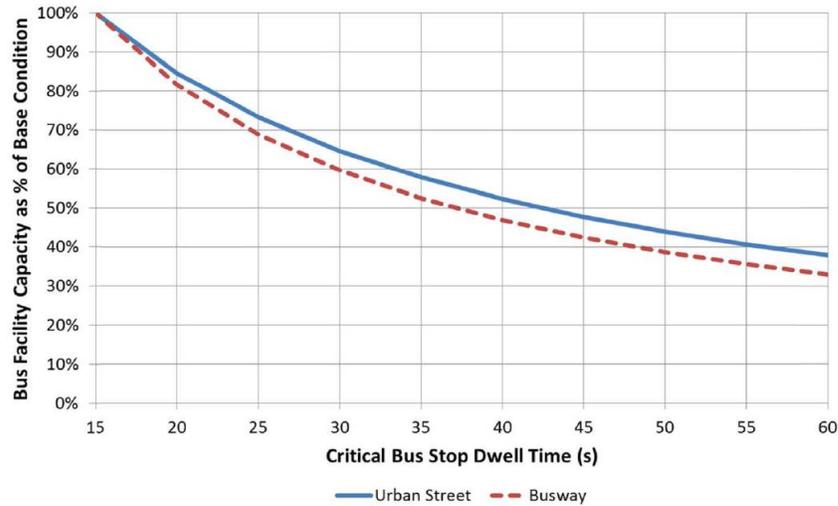
Figura 7. Variabilidad del tiempo de permanencia sobre la capacidad del paradero



Fuente: (TCRP, 2013)

Una comparativa respecto a lo sucede tomando tiempo de permanencias críticos para la capacidad del paradero se puede observar en la Figura 8. Esta condición está dada manteniendo la misma configuración anterior y dejando como base una variabilidad del tiempo de permanencia del 60% en la que se puede observar como con tiempos críticos de 50 segundos de permanencia el paradero ya pierde su capacidad en un 50%. También se puede notar como la vía exclusiva de autobús cae un poco más rápido, debido a libertad del carril en comparación con la vía urbana que mantiene algún tipo de flujo vehicular.

Figura 8. Tiempos de permanencia críticos sobre la capacidad del paradero



Fuente: (TCRP, 2013)

1.3.3 Coordinación de semáforos

El tiempo de las señales de tráfico afecta el tiempo disponible en un turno para que los autobuses entren y salgan de una parada de autobús. Además, el tiempo del rojo en relación con el tiempo de permanencia de un autobús afecta la capacidad del vehículo si los movimientos de los pasajeros han finalizado pero el vehículo debe esperar a que el semáforo se ponga verde y la capacidad del vehículo será menor que si el autobús pudiera salir inmediatamente para que otro autobús pueda utilizar la zona de parada.

1.3.4 Tasa de falla y autorización de intervalo

La tasa de falla es una entrada de diseño y es medida como una probabilidad de que un autobús llegue a su paradero correspondiente y pueda encontrar el espacio libre para presentar servicio. Entre tanto el tiempo de autorización es medido como un intervalo después de que un autobús está listo para partir durante el cual el paradero no está disponible para el uso del siguiente autobús. Parte de este tiempo es fijo, ya que solo consiste en el tiempo que tarda un autobús en arrancar y recorrer su propia longitud, despejando la zona de parada.

Para las condiciones de aglomeración en las zonas de parada uno de los estudios más recientes realizado por (Chioni, Iliopoulou, Milioti, & Kepaptsoglou, 2020) con un modelo de regresión ponderada geográficamente (GWR) establecieron que en la ciudad de Atenas los patrones de mayor aglomeración de los vehículos de transporte público de pasajeros se encuentran en zonas con presencia de tráfico pesado, bajo número de carriles para permitir el adelantamiento. Además, el número de rutas por paradero parece estar vinculado a un aumento de los eventos de agrupamiento en paradas atendidas por varias líneas o rutas de autobús, este hecho puede atribuirse a retrasos como resultado de las interacciones entre vehículos sobre el corredor y su congestión.

Los resultados también demuestran que en corredores con mayor número de carriles presentan menos aglomeración en los paraderos debido a la posibilidad de adelantamiento. Sin embargo, se evidencia que cerca de altos centros de concentración de personas y sectores alejados de las estaciones del metro presentan más aglomeración a pesar del número de carriles debido a los altos tiempos de permanencia que incide en el aumento de tasa de falla.

1.3.5 Zona de parada

Existen otros elementos especialmente importantes para abordar esta investigación que hacen parte e intervienen en la capacidad del paradero. Una de ellas es la zona de parada donde puede constar de una única área de parada, en este caso la capacidad de la zona de servicio en el paradero es equivalente a esta área de parada. Sin embargo, cuando una parada de autobuses consta de múltiples áreas de parada, el número de áreas de parada y el diseño de las mismas influyen en su capacidad.

Por lo general las paradas de autobús que se presentan en la vía pública y en acera son paradas lineales, con lo que el primer autobús que llega ocupa la primera área de carga, el segundo ocupa la siguiente y así sucesivamente. Es importante tener en cuenta que cada área de parada lineal e inmediatamente continua a la anterior es menos eficiente, esto sucede básicamente por tres razones:

En primera medida las áreas de carga trasera se utilizarán con menos frecuencia que la primera área de carga.

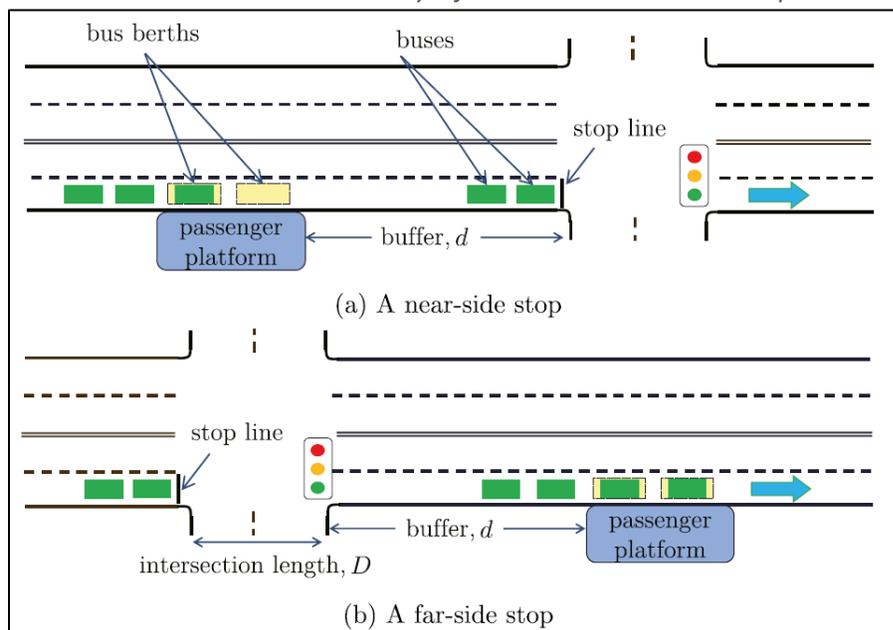
En el segundo caso, sin saber en qué área de carga se detendrá el autobús, es posible que los pasajeros tengan que caminar por la acera en la zona del paradero para llegar a su autobús, lo que aumenta el tiempo de servicio de los pasajeros.

Y el tercer caso que puede ser más crítico que los anteriores ya que dependiendo de qué tan cerca se detengan los autobuses detrás del autobús que está enfrente y de la capacidad de los autobuses para adelantarse entre sí, es posible que un autobús no pueda salir de su área de parada hasta que el autobús que está enfrente salga.

Esta condición se presenta debido a que los tiempos de permanencia de cada ruta e inclusive de cada autobús suelen ser diferentes, así como el horario de llegada. La agrupación de tres o más rutas puede ser aún más crítico debido a que la primera puede influir en la detención de la segunda y la tercera, o la segunda sobre las siguientes.

Aproximaciones de capacidad para paradas de autobús cercanas y lejanas en carriles exclusivos para autobuses (Minyu, Weihua, Sangen, & Han, 2019) realizaron un programa de simulación para desarrollar las aproximaciones analíticas para paraderos en acera de uno o varios módulos de parada en carriles exclusivos para autobuses en el lado cercano o lejano de una intersección.

Figura 9. Paradas de autobús cercanas y lejanas en carriles exclusivos para autobuses



Fuente: (Minyu, Weihua, Sangen, & Han, 2019)

En la Figura 9 se agregaron algunos factores operativos clave como el buffer d y la duración del ciclo semafórico, Las variables son muy completas y permiten establecer tiempos de permanencia independientes de acuerdo a la configuración del autobús, realizar cambios favoreciendo la capacidad de la línea sobre el semáforo o la distancia de buffer.

Uno de los aspectos más reveladores es el efecto en conjunto que genera todo el sistema, ya que por un lado nos muestra que el porcentaje de pérdida de capacidad debido al semáforo es inversamente proporcional a la duración del ciclo, pero también que el porcentaje de pérdida de capacidad es una función no lineal de la duración del periodo en rojo. Algo que no atienden por complejo en las fórmulas para capacidades de la parada desarrolladas en (TCRP, 2013), creando así modelos más generales y precisos además de poder ser utilizados en la planificación de paraderos para condiciones similares.

1.4 Capacidad vial

La capacidad de un corredor vial se define de acuerdo con (HCM, 2016) como el máximo número de vehículos que pueden circular por un punto o tramo durante cierto periodo de tiempo bajo ciertas condiciones destacadas de la vía y el tránsito.

Es importante que para cada caso se destaquen las condiciones base incluso para las fechas en las que se selecciona las tomas de datos puesto que con el tiempo pueden variar. En general las condiciones base suponen: condiciones de pavimento buenas y secas, buen clima, usuarios conocedores del sistema y que no existan elementos externos que impidan el flujo del tráfico.

Eventualmente en la ciudad de Bogotá se pueden presentar; cierres de uno de los carriles por mantenimiento; detenciones vehiculares de entidades bancarias, servicios públicos o construcciones; y desafortunadamente de los menos esporádicos la accidentalidad por choques entre vehículos mayormente menores sin embargo con tiempos en detención altos, así como otras por fallas mecánicas.

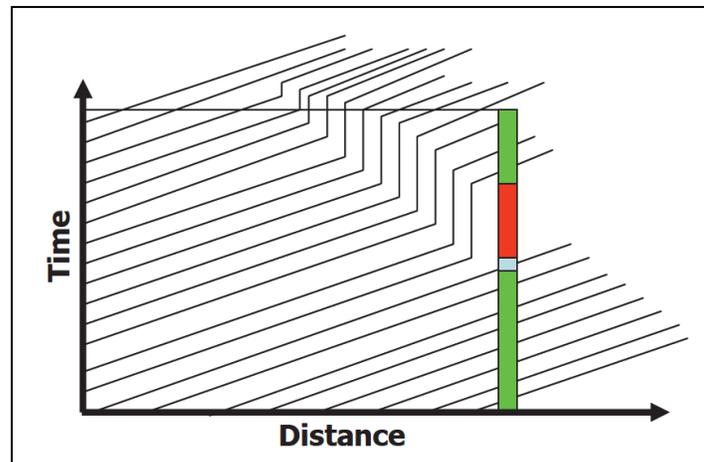
Sobre la calzada, las condiciones dependen de elementos geométricos y de otros tipos, que pueden influir directamente en la capacidad, sin embargo, en otras ocasiones puede afectar una medida de rendimiento como la velocidad, (HCM, 2016).

Los factores que influyen en la calzada son:

- Número de carriles
- Ancho de carril
- Velocidad de diseño
- Alineaciones horizontales y verticales
- Tipos de elementos del sistema, semáforos etc.
- Entorno de desarrollo
- Carriles adicionales para paraderos, giros canalizados en intersecciones o salidas.

Para intersecciones semaforizadas en el momento de las detenciones en efecto de la señal de parada, se forma una cola clásica acumulando los vehículos de forma lineal. En la Figura 10 se muestra una acumulación y liberación de cola en una parada semaforizada.

Figura 10. Acumulación y liberación en detenciones



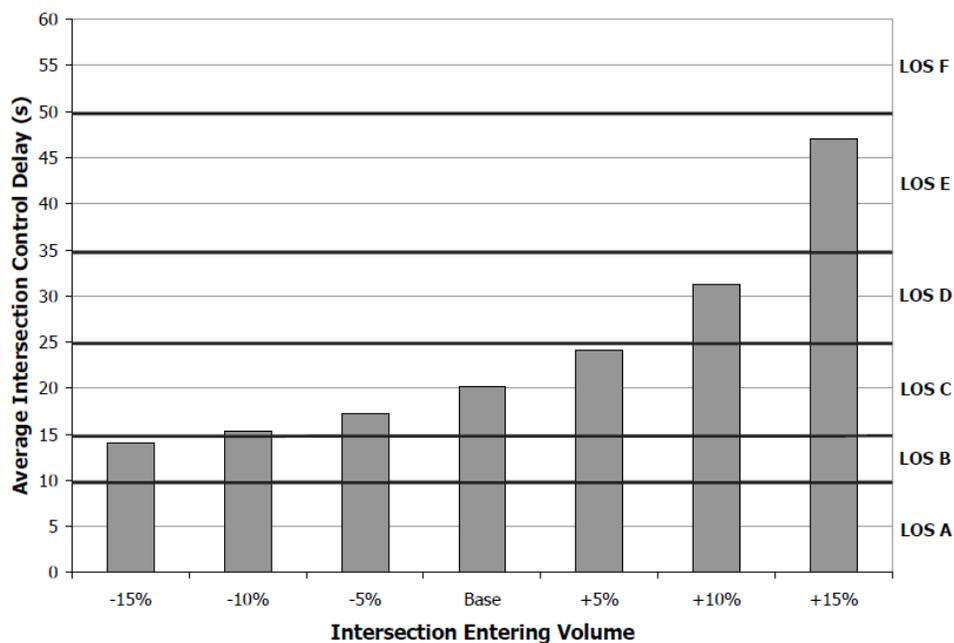
Fuente: (HCM, 2016)

La forma angular de las líneas de trayectoria de flujo interrumpido no representa la aceleración y desaceleración en sus formas verdaderas, es decir las líneas verticales se presentan directamente por la detención, pero es necesario deformarlas al empalme de su flujo debido a las aceleraciones y desaceleraciones progresivas de todo el conjunto de vehículos.

Por otra parte, si el corredor presenta 2 o más carriles se pueden presentar adelantamientos en la activación de la línea de parada, no necesariamente la vía se despeja en el mismo orden de llegada puesto que dependiendo del usuario y de la aceleración del vehículo se obtiene una tasa de despeje, siendo este el factor que incide sobre cada uno de los carriles.

En la Figura 11 se presenta un ejemplo de un ensayo sobre el efecto de la parada en una intersección semaforizada de acuerdo a la variación del volumen hasta en un 15% expuesto en (HCM, 2016) para identificar la sensibilidad en los niveles de servicio.

Figura 11. Demora promedio de control respecto al aumento de volumen



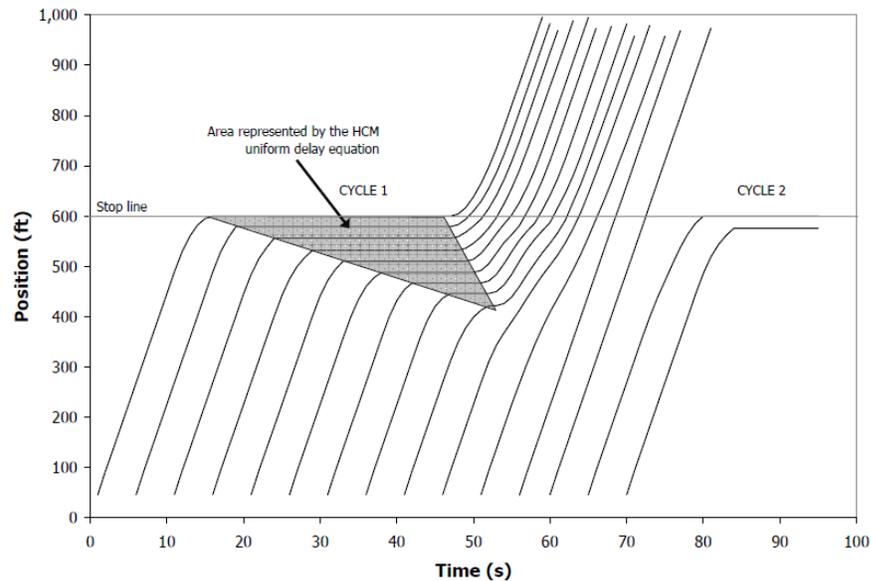
Fuente: (HCM, 2016)

Este análisis es particularmente útil a la hora de trabajar con pronósticos de volumen que tiene asociado un grado relativamente alto de incertidumbre donde se puede notar la sensibilidad en el aumento del volumen de tráfico.

El análisis de capacidad que se desea atender para un corredor vial urbano esta normalmente intervenido por intersecciones principalmente semaforizadas. Entre estas intersecciones se encuentran los paraderos del sistema, por lo cual el análisis específico y en conjunto de estas modalidades permitirán análisis más afines con la realidad.

En efecto de la intersección semaforizada puede ocurrir como se muestra en la Figura 12, una simplificación clásica para la acumulación y descarga para una intersección semaforizada de la posición en el tiempo por efecto de la misma según (HCM, 2016).

Figura 12. Trazado de trayectorias con línea de parada.



Fuente: (HCM, 2016)

En términos más completos, dependiendo de la relación volumen/capacidad puede ocurrir una de las siguientes condiciones:

Relación v/c menores a 1.0 en las que todos los vehículos que llegan en un ciclo dado pudieron despejar en el mismo ciclo. Así como se muestra en la Figura 12, desde el inicio hasta el primer minuto, todos los vehículos que se formaron en cola y que están dentro del ciclo 1 pueden pasar la intersección antes del inicio del ciclo 2.

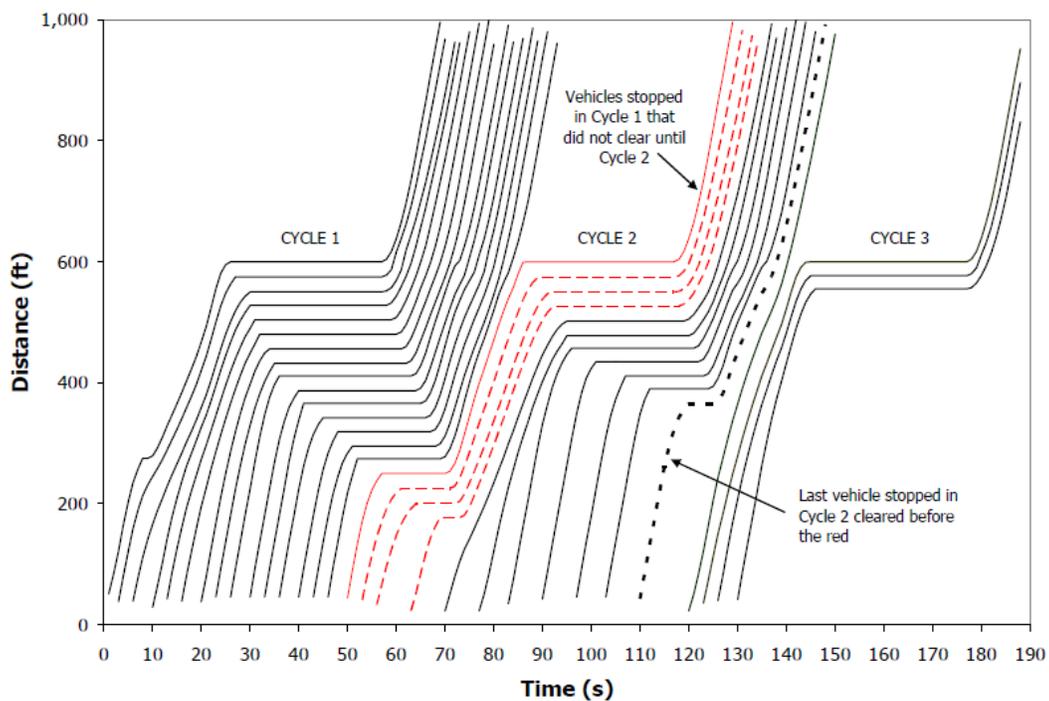
Relación v/c similares o superiores a 1.0, para estos casos pueden ocurrir fallos de tres maneras diferentes.

Fallo del ciclo cuando las colas residuales se acumulan por un ciclo más como se observa en la Figura 13, pero en el segundo ciclo son despejadas en conjunto sin que se repita en el tercero.

Operación sobresaturada, situación que se presenta cuando el enlace tiene un volumen de demanda que excede la capacidad del enlace y las colas se extienden a lo largo del enlace de aproximación como se observa en la Figura 14.

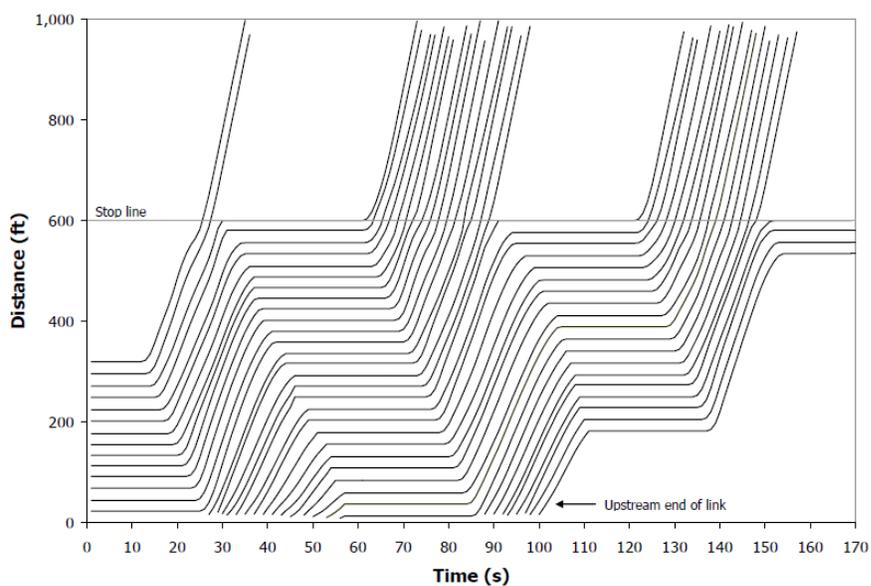
Operación insaturada, situación que se presenta cuando las colas se extienden hasta un enlace aguas arriba durante una parte de un ciclo debido a intersecciones poco espaciadas.

Figura 13. Fallo de ciclo



Fuente: (HCM, 2016)

Figura 14. Operación sobresaturada



Fuente: (HCM, 2016)

Tabla 5. Resumen del estado del arte de investigación

<p>Bus Dwell Time Estimation and Prediction: A Study Case in Shanghai-China Cen ZHANG, Jing TENG</p> <p>Bus service time estimation model for a curbside bus stop. 2015 Bomin Bian, Ning Zhu, Shuai Ling, Shoufeng Ma</p>	<p>Estos artículos están directamente relacionados con las paradas de autobuses en paraderos laterales con estimaciones propias, determinaciones de tiempos, detenciones y consecuencias sobre otros autobuses y pasajeros. Algunos de sus objetivos van enmarcados a encontrar un modelo que les permita predecir los tiempos de detenciones teniendo en cuenta la capacidad de los vehículos, el número de pasajeros e incluso factores como el hacinamiento en los paraderos.</p> <p>Mientras en el desarrollo de (ZHAG. 2013) se realizó bajo una ruta completa (Linea Jiading 3) con 17 paraderos, en el de (BIAN, 2015) se realizó en la parada de autobús ubicada en Anshanxi Road en el distrito de Nankai, Tianjin, China.</p> <p>Las metodologías usadas para (ZHAG, 2013) y (BIAN, 2015) se desarrolla y usan modelos de estimación respectivamente a partir de registros visuales. En el primer caso crean tres modelos de estimación y en el segundo caso se usa el modelo de Poisson bajo 4 conflictos en la sección vial.</p> <p>Si bien los propósitos de estimar capacidades y tiempos de permanencia son la prioridad en estos artículos, estos contenidos surgieron partir de la necesidad de poder controlar y mejorar los tiempos de recorrido de los autobuses debido al aumento en los tiempos de viaje de sus rutas y lograr reducir al máximo la aparición de colas en las áreas de entrada a los paraderos.</p>
<p>Capacity approximations for near- and far-side bus stops in dedicated bus lane Minyu Shen, Weihua Gu, Sangen Hu, Han Cheng</p>	<p>Este artículo está muy relacionado con los dos anteriores y también crean un modelo de estimación, sin embargo, las condiciones de estudio están enfocadas a autobuses con carriles exclusivos, tanto para rutas con paradas cercanas como lejanas.</p> <p>La metodología es más actual y permite revisar información, modelarla y analizarla de una manera más moderna a partir de versiones de software de modelación muy efectivos y con aproximaciones mucho más precisas. Es muy probable que en el desarrollo de este trabajo de grado se requiera modelar de una forma similar, pero enfocado únicamente a unos sectores en particular.</p>
<p>Bus stop and bus terminal capacity Azhar Al-Mudhaffar , Albania Nissan, Karl-Lennart Bang</p>	<p>Se desarrolla en la ciudad de Estocolmo, en este caso desean crear por medio del modelo de la HCM2000 con un factor de corrección por tratarse de una ciudad tan grande, un modelo que permita considerar la distribución de la llegada de bus, evaluando la capacidad previamente del paradero o terminal y su relación con las rutas propuestas y número de paradas.</p> <p>Este artículo es bien interesante ya que esta es una forma apropiada de planificar paraderos y terminales. Sus resultados están expuestos en el número total de buses que puede ser atendido por un paradero o terminal en una unidad de tiempo en relación con la frecuencia para cada línea de bus y los factores a considerar que afectan la capacidad.</p>

Resumen del estado del arte de investigación

<p>Exploring spatial variation of the bus stop influence zone with multi-source data: A case study in Zhenjiang, China. Yingjiu Pan Shuyan Chen TiezhuLi Shifeng Niu KunTang</p>	<p>Este artículo está muy relacionado con (BIAN, 2015), utiliza un modelo de regresión ponderada geográficamente, para estimar y analizar paradas de buses en una zona de influencia, estudiando colas de autobuses e interferencias con intersecciones, pero enfocado únicamente con el objetivo de revelar factores de emisiones.</p>
<p>Modelling bus bunching and holding control with vehicle overtaking and distributed passenger boarding behavior. 2017. Weitiao Wu, Ronghui Liu, Wenzhou Jin</p> <p>Simulation-based robust optimization of limited-stop bus service with vehicle overtaking and dynamics: A response surface methodology. 2019. Weitiao Wu, Ronghui Liu, Wenzhou Jin, ChangxiMa</p> <p>Autonomous shuttle bus service timetabling and vehicle scheduling using skip-stop tactic. 2019. Zhichao Cao, Avishai (Avi) Cederb</p>	<p>Estos artículos buscan objetivos muy similares en cuanto al control de rutas como efecto de la agrupación de buses ya sea dentro de su ruta o como efecto de sus paradas. En el primero (Weitiao, 2017) desarrolla una estrategia de control a partir de un modelo de propagación de autobús que tenga en cuenta el adelantamiento de vehículos y un embarque distribuido de los pasajeros, los efectos de tal estrategia son probados en Guangzhou, China, donde se muestran algunos beneficios sobre todo en servicios de alta frecuencia.</p> <p>Para el segundo caso (Weitiao, 2019), interesado por el control de rutas ahora se enfoca directamente en la dinámica de la demanda y en el adelantamiento para las paradas de autobuses, esto con el propósito de minimizar los costos de operación y del usuario. Este artículo se desarrolló para planificar las rutas antes de ponerlas en marcha, por esto fue necesario la aplicación de una simulación para tomar decisiones sobre omitir paradas en lugar de que se formen agrupaciones de buses y se pueda mejorar los tiempos de viaje.</p> <p>Algo similar se realizó en Auckland, New Zealand (Zhichao, 2019), donde a partir de la demanda de pasajeros se identificaron zona para omitir parada y optimizar las rutas de transporte público, lo interesante de este artículo es que el modelo funciona en tiempo real, asignando rutas para satisfacer las demandas de acuerdo a las capacidades de los vehículos.</p>
<p>Optimization of headways with stop-skipping control: a case study of bus rapid transit system. 2014. Xumei Chen, Bruce Hellinga, Chengzhi Chang, Liping Fu</p>	<p>Se desarrolla un modelo de optimización para una de las líneas BRT de Beijing, con el propósito de mejorar los tiempos y los costos de operación, al igual que (Weitiao, 2017) se realiza procedimientos de omisión de paradas y paradas optimas de acuerdo a las demandas de los pasajeros en cada una de sus estaciones, paradas con pocos pasajeros son omitidas por el modelo con el propósito de optimizar el sistema.</p>

Resumen del estado del arte de investigación

<p>Time-of-day vehicle mileage fees for congestion mitigation and revenue generation: A simulation-based optimization method and its real-world application. 2016. Xiqun (Michael)Chen, ChenfengXiong, XiangHe, ZhengZhu, LeiZhang</p>	<p>Aunque no está enfocado a transporte público o paradas de autobuses, en este artículo aplican modelos sustitutos para mejorar los tiempos de viaje de la red incluyendo pasos por peajes. No solo aplicaron modelos sino también simulaciones calibradas con la realidad. En el caso de estudio utilizaron una red de gran tamaño con 1077 nodos y 2158 enlaces, aunque logran optimizar el sistema siempre queda a incertidumbre congestión no inducida o impactos climáticos.</p>
<p>Optimization of bus stops layout under the conditions of coordinated control. 2017. Zupeng Liu, Keping Li, Ying Ni</p>	<p>Se enfoca en la optimización de los paraderos de autobuses, la posición adecuada del paradero de acuerdo a próximas intersecciones y el número de paradas permitidas en el paradero. Se realizó una simulación en un tramo de vía con 10 semáforos y al menos 8 paraderos, para verificar el comportamiento en el retraso de rutas con tráfico normal para tres tipos de configuraciones.</p>
<p>Optimization of transit total bus stop time models. 2016. Stephen Arhin, Errol Noel, Melissa F. Anderson, Lakeasha Williams, Asteway Ribisso, Regis Stinson</p>	<p>Se incorpora una variable más para el cálculo del tiempo total de detención de autobuses en paraderos, el tiempo que tarda el bus en estacionarse y el volver a ingresar a la calzada, este tiempo está siendo ignorado o despreciado en los estudios de planificación de rutas de tránsito de autobuses, se puede notar que este tiempo es importante sobre todo en las horas pico, se realizó en de Washington DC a 60 paraderos de autobuses.</p>
<p>Análisis del Tiempo de Permanencia en Parada de los Buses del Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá en la Calle 72 Entre Carrera 68 y Avenida Boyacá. 2016. Lady Bautista.</p>	<p>Se realiza un comparativo de los métodos de pago para el uso del sistema de transporte público y determinar los tiempos de permanencia en las paradas de los autobuses. Se ejecuta un análisis de cada componente que puede conllevar tiempo en el proceso creando escenarios y realizando mediciones para un caso de estudio. Se tiene en cuenta factores que intervienen para el tiempo de detención como: el ascenso y descenso de pasajeros, apertura y cierre de puertas, operación en simultaneo, la modelación se realiza en PTV Vissim para los cuatro escenarios creados y así determinar las mejores opciones que disminuyan el tiempo de detención en las rutas de los operadores.</p>

Fuente: Autores – bibliografía.

2. INFORMACIÓN Y PROCESAMIENTO

2.1 Descripción de la zona

La zona planteada para el desarrollo de esta investigación, se encuentra en la ciudad de Bogotá sobre la intersección de la Avenida Calle 100 con Carrera 19 en el costado occidental, revisando los corredores externos norte y sur como se muestra en la Figura 15. El sector está completamente intervenido por zonas residenciales, ejecutivas y comerciales. Este corredor también funciona de enlace para conectar de manera transversal la Carrera 7 con la Carrera 68 hacia el Sur.

Figura 15. Zona de estudio



Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano, 2018

El corredor de la Avenida Calle 100 este compuesto por 4 calzadas mixtas que se distribuyen de acuerdo con su origen y destino; La primera tiene como destino la glorieta de la Carrera 15; la segunda tiene como destino el paso elevado de la Carrera 15 y conectar directamente con la Carrera 11, estas dos tienen como origen el paso elevado sobre la Autopista Norte de oriente a occidente y el Ramal suoriental;

la tercera calzada tiene como origen los usuarios del paso elevado desde la Carrera 11 hacia el occidente y finalmente sobre la cuarta calzada tiene como origen la glorieta de la Carrera 15, estos dos tienen como destino el paso elevado de la Autopista Norte y el Ramal W-N.

Sobre la primera calzada se encuentra una serie de paraderos antes de la intersección semaforizada conveniente para el análisis, así como en la cuarta calzada un paradero posterior a la intersección para aplicar el mismo análisis.

En la Figura 16 se puede observar la configuración de la Calzada 1, la cual contiene 3 carriles cada uno con un ancho de 3.30m, sobre el Carril N°1 se ubican los vehículos que desean realizar giro a derecha, sobre el mismo también se realizan las detenciones del sistema integrado de transporte público en un paradero con 3 módulos.

Figura 16. Calzada 1 – Sur Externa

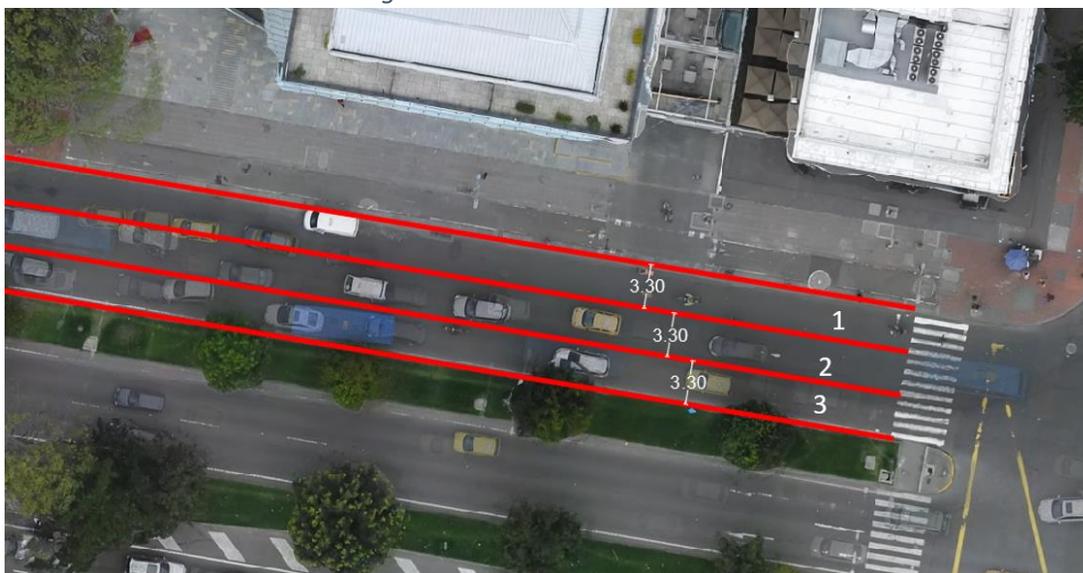


Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano, 2018

La Calzada norte externa está compuesta igualmente por 3 carriles de 3.30m cada uno, sobre el Carril N°1 se encuentra la zona de parada. Se contempla que para cualquier de los 3 carriles se realice la

incorporación del giro a derecha desde la Carrera 19 costado norte. En la Figura 17 se visualiza la configuración de la calzada.

Figura 17. Calzada 4 – Norte Externa



Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano, 2018

2.2 Configuración de paraderos

Los paraderos de interés están expuestos en las calzadas externas del corredor, en el costado Norte, es decir, la calzada 4 de la Figura 15, sobre la cual se presenta el **Paradero 242A01 Br. Santa Bibiana** el cual se encuentra a 70m después de la intersección de la Av. Calle 100 y la Av. Carrera 19 como se muestra en la Figura 18, se trata de un paradero de modulo único Tipo 5.

En la calzada 1 de la Figura 15 se presenta el **Paradero 212 con módulos A00, B00 y C00**, las distancias con respecto a la intersección se presentan en la Figura 19; el módulo A se encuentra a 45m de la intersección; el módulo B a 70m de la intersección y 25m del módulo A hacia el occidente; el módulo C se encuentra a 155m de la intersección y 55m del módulo B hacia el occidente. Este paradero de 3 módulos es una modificación posterior a lo que antes sería únicamente el módulo B, el cual se encuentra enfrente con el paradero 242A01 y que debido a incorporaciones progresivas de rutas del SITP fue

necesario ir ampliando el número de módulos para atender los servicios de todos los autobuses los cuales sobre pasaron la capacidad.

Figura 18. Ubicación Paradero 242A01 Br. Santa Bibiana



Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano, 2018

Figura 19. Ubicación Paradero 212 Br. Santa Bibiana



Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano, 2018

Las dimensiones de la zona del paradero están representadas de acuerdo a lo expuesto en la resolución 264 de (Secretaria Distrital de Movilidad, 2015), con algunas pequeñas diferencias sobre los anchos disponibles de andén o la presencia de ciclorruta.

A continuación, se anotan las dimensiones de los paraderos en estudio, donde en todos los casos a pesar de que solo existe una línea de parada para el autobús de servicio, en campo se ha verificado la ubicación normal y simultaneo de dos autobuses. En la Figura 20 se presentan las dimensiones del paradero Norte.

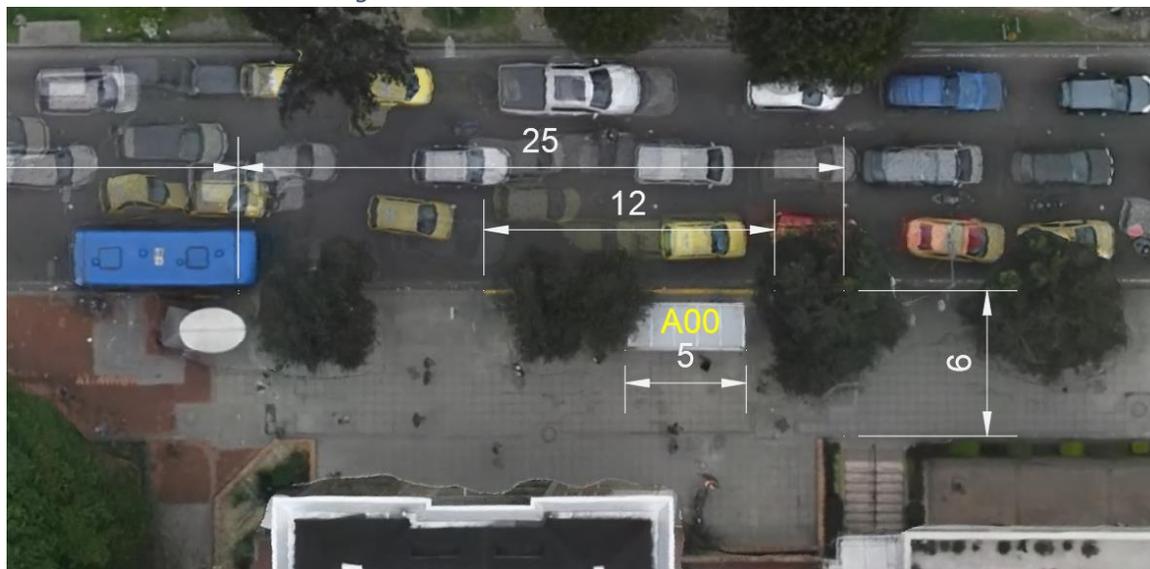
Figura 20. Dimensiones Paradero 242A01



Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano, 2018

En la Figura 21 se presenta la configuración del Módulo A00 del paradero 212, la longitud completa se estimada de acuerdo a las detenciones de los buses, sin embargo, el espacio utilizado por los pasajeros puede extenderse longitudinalmente por toda la acera.

Figura 21. Dimensiones Paradero 212A00



Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano, 2018

En la Figura 22 se presenta la configuración del módulo B00 del paradero 212, igualmente la longitud total se anota de acuerdo a los límites usados en las paradas de autobuses, de tal manera que el módulo M10 del paradero en este caso se encuentra desplazado hacia la parte trasera.

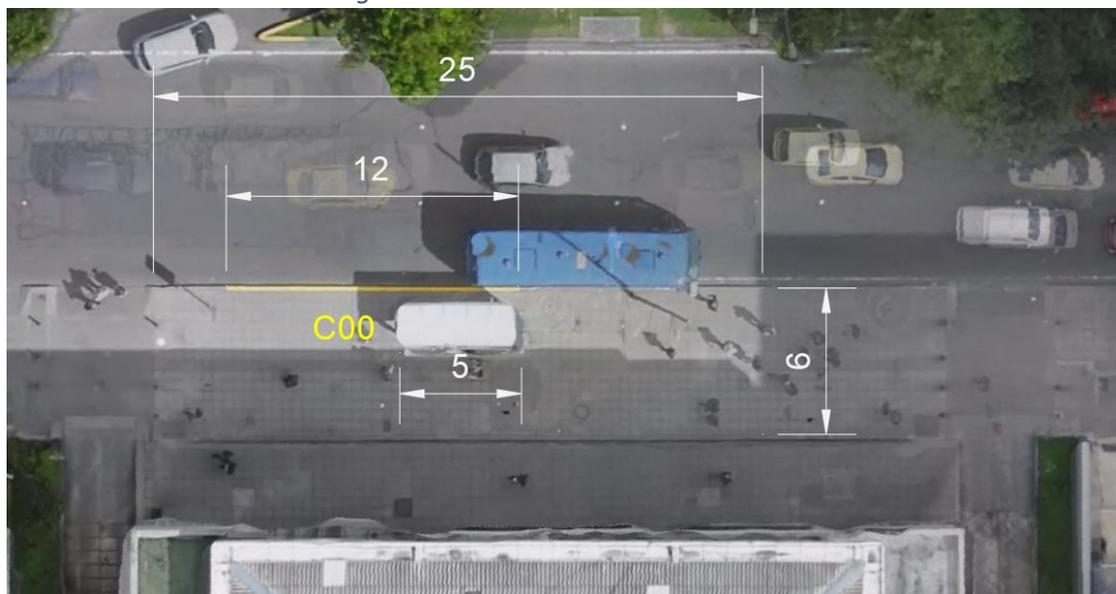
Figura 22. Dimensiones Paradero 212B00



Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano, 2018

En la Figura 23 se presenta el módulo C00 del paradero 212.

Figura 23. Dimensiones Paradero 242C00



Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano, 2018

2.3 Servicio de Rutas

A continuación, se muestran todas las rutas que presenta servicios en los paraderos del análisis, teniendo en cuenta que estas rutas son modificables durante el tiempo: eliminando, modificando o agregando según las disposiciones de oferta y demanda en la ciudad. En la Tabla 6 se presenta las rutas para el paradero 242A01.

Tabla 6. Rutas Paradero 242A01

Ruta	Nombre
37	El Palmar - Unicentro
193	Bachué - Marly
200	AV. Ciudad de Cali - Unicentro
291	Terminal Norte Makro Tierra Buena
402	Auto Norte - Est. Terminal - Sabana del Dorado
403A	Engativá - Unicentro
442	Mirandela Villa Gladys
634	Bosa San José - Calle 153
639	Calle 183 - Santo Domingo
661	Andalucía - Península
722	Palmitas - San Cristóbal Nte.
801A	Chico Norte - Engativá
E70	Casaloma Usme - Colina
F404	Patio Bonito
H606	San Joaquín
H610	Paraíso
K904	Salitre Greco
T62	Metrovivienda - Casablanca Norte
Z4B	Estación Terminal - Terminal Salitre
Z8	Toberín - Metrovivienda

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7 muestran las 6 rutas que presentan servicio en el paradero 212A00.

Tabla 7. Rutas Paradero 212A00

Ruta	Nombre
291	Terminal Norte Makro Tierra Buena
465A	Bosa San José - Clínica Barraquer
A606	Chicó norte
A610	Chicó Norte
B904	La estrellita
E70	Casaloma Usme - Colina

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 8 se muestran las 9 rutas que presentan servicio en el paradero 212B00

Tabla 8. Rutas Paradero 212B00

Ruta	Nombre
402	Auto Norte - Est. Terminal - Sabana del Dorado
442	Mirandela Villa Gladys
634	Bosa San José - Calle 153
661	Andalucía - Península
801A	Chico Norte - Engativá
A611	Estación Calle 100
B404	Calle 222
T62	Metrovivienda - Casablanca Norte
Z8	Toberín - Metrovivienda

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 9 se muestran las 6 rutas que presentan servicio en el paradero 212C00.

Tabla 9. Rutas Paradero 212C00

Ruta	Nombre
37	El Palmar - Unicentro
193B	Bachué - Marly
200	AV. Ciudad de Cali - Unicentro
403A	Engativá - Unicentro
722	Palmitas - San Cristóbal Nte.
Z4B	Estación Terminal - Terminal Salitre

Fuente: Elaboración propia

2.4 Aforos

Dentro del desarrollo del proyecto se realizaron aforos vehiculares sobre cada corredor para revisar los volúmenes presentes en las zonas de los paraderos. El punto de aforo está identificado sobre cada paradero y la intersección semaforizada de la Av. Calle 100 con Av. Carrera 19.

Los aforos fueron realizados días hábiles entre el martes y el jueves de los meses de octubre y marzo para los paraderos 242A01 y 212 en horarios pico desde 5:30pm hasta 6:30pm y 7:30am hasta 8:30am respectivamente, para destacar datos de entrada para la posterior micro simulación referente a: volúmenes de tráfico mixto, composición vehicular, aforo de autobuses del sistema de transporte público, tiempos de permanencia, fases, tiempo de ciclo semafórico y ruta de origen destino.

En la Tabla 10 se encuentra los volúmenes y composición vehicular del tráfico mixto presente sobre la Av. Calle 100 con Av. Carrera 19 costado noroccidental sin incluir las rutas del sistema de transporte público, estos volúmenes al ser tomados en el paradero 242A01 incluyen los vehículos que realizan giro a derecha desde el norte de la Av. Carrera 19.

Tabla 10. Volúmenes y composición vehicular Av. Calle 100 W-N

Autos	640	49.8%
Motos	469	37.1%
Bus	40	2.9%
Taxi	112	8.2%
CP	22	1.6%
CG	6	0.5%
Total	1289	100.0%

Fuente: Elaboración propia

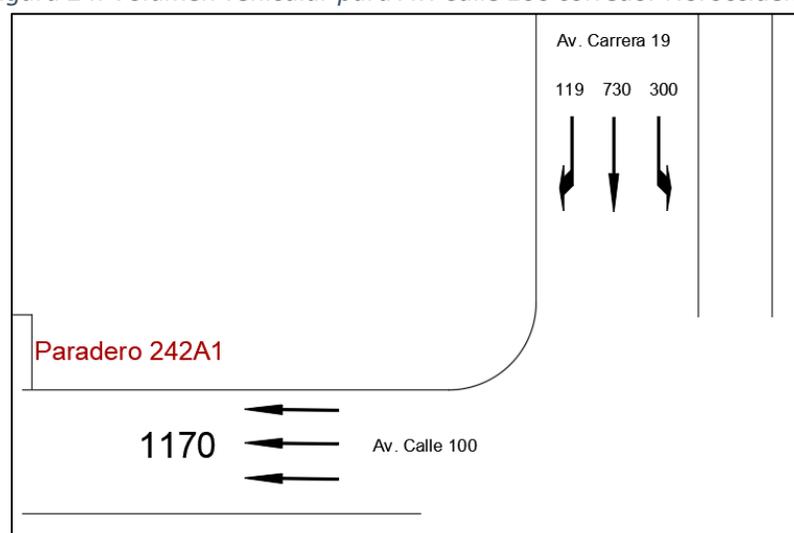
En la Tabla 11 se presentan los volúmenes vehiculares para la hora pico de 5:30pm a 6:30pm de la Av. Carrera 19 costado norte sobre la intersección con la Av. Calle 100, donde la columna NW resulta de obligatorio interés para el análisis sobre la zona del paradero 242A01.

Tabla 11. Volumen y composición vehicular Av. Carrera 19 Norte

19N	NS	NW	NE	Total
Autos	442	72	182	696
Taxi	127	21	53	201
Motos	114	18	45	177
Bus	32	5	13	50
CP	15	3	7	25
Total	730	119	300	1149

Fuente: Elaboración propia

Figura 24. Volumen vehicular para Av. Calle 100 corredor Noroccidental



Fuente: Elaboración propia

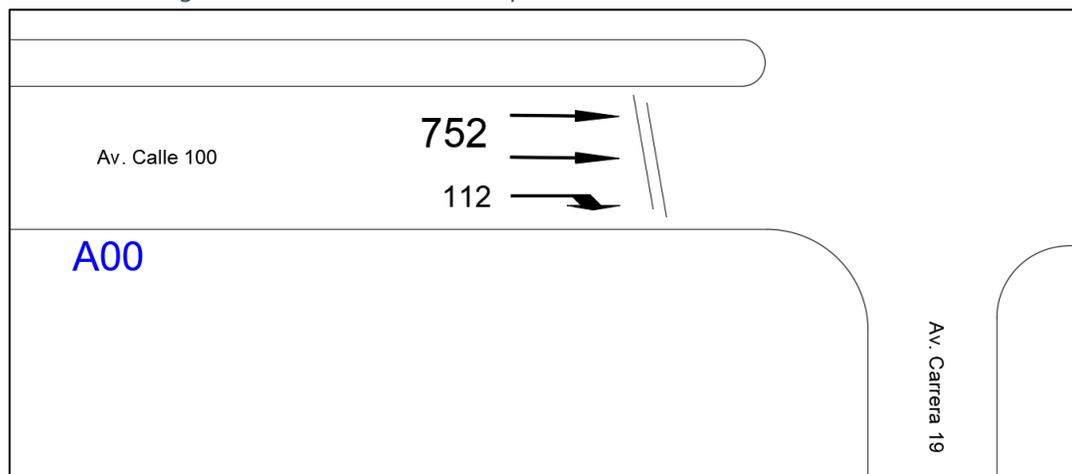
En la Tabla 12 se encuentran los volúmenes y composición vehicular del tráfico mixto presente en la línea de paraderos 212 en la Av. Carrera 100 con Av. Carrera 19 costado Suroccidental sin incluir los autobuses del sistema de transporte público SITP.

Tabla 12. Volúmenes y composición vehicular Av. Calle 100 suroccidental

Autos	415	48.0%
Taxi	224	25.9%
Motos	181	20.9%
Bus	16	1.9%
CP	24	2.8%
CG	4	0.5%
Total	864	100.0%

Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Volumen vehicular para Av. Calle 100 corredor Suroccidental



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 25 se presenta el esquema con volúmenes sobre el paradero 212. En la intersección el 13% del volumen realiza el giro a derecha con destino a la Av. Carrera 19 sur.

2.4.1 Aforos del sistema de transporte público SITP

Para las mismas horas pico se realizaron los aforos de los autobuses del sistema de transporte público de pasajeros SITP. En la Tabla 13 se encuentran los Autobuses que presentaron servicio en el paradero 242A01 durante el horario de 5:30pm a 6:30pm, indicando el tipo de bus y número de paradas.

Tabla 13. Aforo SITP paradero 242A01

Ruta	Cantidad	Tipo	Parada
37	6	Bus19	5
183	3	Bus19	1
200	6	Bus40	5
K904	7	Bus40	5
291	5	Bus80	4
402	7	Bus40	6
442	7	Bus40	5
466	1	Bus40	0
634	4	Bus80	3
639	8	Bus80	5
661	2	Bus19	2
722	3	Bus40	1

Ruta	Cantidad	Tipo	Parada
F404	3	Bus80	2
912	3	Bus40	1
193b	3	Bus19	3
403a	8	Bus40	5
801a	4	Bus80	2
C53	2	Bus19	2
E70	3	Bus40	1
H606	5	Bus80	4
T62	6	Bus40	4
Z4b	3	Bus19	1
Z8	3	Bus40	2
H610	4	Bus80	4
Total	106		73

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 14 se encuentran las rutas que presentan parada en los módulos A00, B00 y C00 del paradero 212 de la Av. Calle 100. Se destaca que para este paradero todas las rutas que transitan por el corredor realizan servicio en el horario de hora pico entre las 7:30am y 8:30am.

Tabla 14. Aforo SITP paradero 212-00

Modulo	Ruta	N paradas	Tipo
A	291	6	Bus80
A	465A	5	Bus40
A	A606	9	Bus80
A	A610	7	Bus80
A	B904	6	Bus40
A	E70	3	Bus40
B	402	6	Bus80
B	442	9	Bus40
B	634	7	Bus80
B	661	10	Bus40
B	801A	3	Bus40
B	A611	6	Bus40
B	B404	9	Bus80
B	T62	8	Bus40
B	Z8	5	Bus40
C	37	9	Bus19
C	200	6	Bus40

Modulo	Ruta	N paradas	Tipo
C	722	2	Bus40
C	193B	3	Bus19
C	403A	6	Bus40
C	Z4B	2	Bus19
Total		127	

Fuente: Elaboración propia

2.4.2 Tiempos de permanencia

Los tiempos de permanencia fundamentales en el desarrollo de este trabajo, fueron de acuerdo con preferencias en las indicaciones del (HCM, 2016), medidos directamente en campo sobre las mismas horas de los aforos del SITP Urbano sobre el mismo aforo y otros días de la semana para establecer varias mediciones de tiempo y mayores datos especialmente para rutas con bajos volúmenes.

A continuación, se encuentran las Tabla 15 y Tabla 16 de cada ruta y paradero con los tiempos en segundos medidos desde el momento de apertura de puertas para abordaje y descenso del autobús.

Tabla 15. Tiempos de permanencia en segundos del paradero 242A01

RUTA	Tiempos de Permanencia							
37	12	22	13	13	27	25	16	22
183	14	17	13	17				
200	24	31	27	22	14	25		
K904	35	31	36	29	41	44		
291	15	26						
402	35	32	39	32	36			
722	21	19	17	22				
442	11	19	25	27	14	11		
634	37	27	31	38	41	29		
639	7	20	24	12	26			
661	27	31	26	25				
F404	36	40	31	17	23	37		
912	16	15						
193b	27	36	23	34				
403a	37	39	38	51	33			
801a	19	22	15					
C53	17	13	15	14				
E70	13	15						
H606	26	21	47	51	17			

RUTA	Tiempos de Permanencia				
T62	17	12	13	20	11
Z4B	19	18	22	22	
Z8	15	15	15	17	
H610	12	41	46	17	

Fuente: Elaboración propia

En cada módulo del paradero 212 se tomaron los tiempos de permanencia para cada ruta del SITP.

Tabla 16. Tiempos de permanencia en segundos del paradero 212-00

Modulo	Ruta	Tiempo de permanencia							
A	291	25	21	21	14	17			
A	465A	15	25	9	9				
A	A606	10	20	14	15	22	16	12	18
A	A610	9	14	34	18	17			
A	B904	9	17	24					
A	E70	28	20	6	10	7	18	15	
B	402	50	23	14	23	16			
B	442	18	10	13	13	13			
B	634	20	16	17	14	22	13		
B	661	26	35	24					
B	801A	7	16	8					
B	A611	48	52	22	34	16			
B	B404	7	17	14	12	15	18		
B	T62	23	12	15	12	9			
B	Z8	21	40	36	23				
C	37	23	21	13	7	10	12	21	15
C	200	16	39	15	10	15			
C	722	18	17						
C	193B	14	13						
C	403A	21	47	12	28	13	55		
C	Z4B	22	19	20	18				

Fuente: Elaboración propia

Las mediciones de tiempo de permanencia para ambos paraderos y sus diferentes módulos fueron tomados en el momento de activación de las puertas de ingreso y descenso de los pasajeros. Varias rutas presentaron tiempos adicionales debido a la ocupación del carril o zona de parada como se muestra en la Figura 26, este tipo de escenarios se presentan especialmente en el paradero 212 debido a la ocupación

de carril y una cola que puede ocupar con normalidad hasta el módulo B00 para los vehículos que realizan giro a derecha con destino Av. Carrera 19 al sur. Los porcentajes de vehículos en giro a derecha y cambio de carril fueron anotados con anterioridad en los aforos para realizar las modelaciones lo más finas posibles.

Figura 26. Ocupación del carril de zona de parada por tráfico mixto.



Fuente: Av. Calle 100. Elaboración propia

Figura 27. Distribución de pasajeros en area del paradero



Fuente: Av. Calle 100. Elaboración propia

En la zona de abordaje, módulo de paradero y espera de pasajeros como se muestra en la Figura 27 se identificó que los usuarios se mueven y esperan dentro de área del paradero enfrentados con la

zona de parada del autobús, de esta manera el flujo de abordaje es constante sin mayores interrupciones. De la misma manera, cada autobús que presenta servicio en el paradero realiza la detención sobre la línea señalizada. También se demostró que cada módulo de paradero puede activar en simultaneo y con normalidad dos autobuses.

2.5 Procesamiento de datos

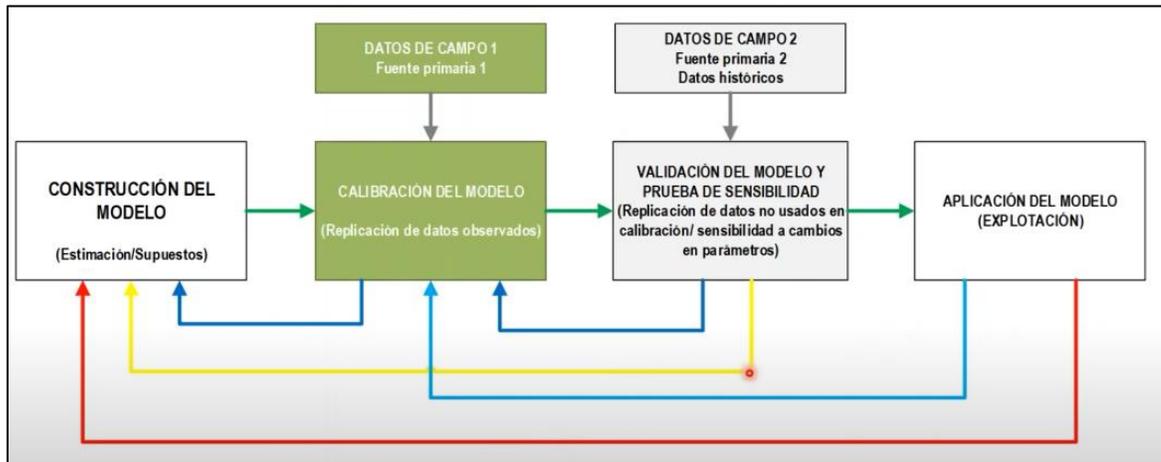
Con el propósito de continuar con el modelo de micro simulación, todos los datos obtenidos en campo y por medio de ortofotos son procesador para registrar; medidas de longitudes, anchos de carril y configuración de intersección; volúmenes y composición vehicular; identificación de rutas, paradas en servicio y tiempos de permanencia. Revisando, filtrando y organizando, así como en el numeral 2.4 toda la información requerida para incorporar al modelo de micro simulación.

2.6 Modelo de micro simulación

Por medio del software PTV Vissim se realiza el modelo de micro simulación de tráfico para efectuar el análisis de capacidad sobre el corredor, PTV Vissim es un software de simulación de tráfico avanzado creando interacciones complejas de vehículos de forma realista de nivel microscópico. Modela demanda, oferta y revisa el comportamiento de movimiento a detalle ya que permite la introducción de cada parámetro representado en campo que permita generar un modelo realista.

En la Figura 28 se muestra el proceso de modelado en transporte donde es necesario: la construcción de modelo por medio de los datos de campo, calibración del modelo, validación del modelo y pruebas de sensibilidad y finalmente la aplicación o explotación del modelo.

Figura 28. Proceso de modelado en transporte



Fuente: (PTV_GROUP, 2021)

2.6.1 Tipo de vehículos

Para el inicio del modelo en PTV Vissim se han designado de acuerdo a las observaciones en campo los siguientes tipos de vehículos.

- Automóvil / camioneta

Fueron elegidos 10 modelos 3D de vehículos entre 3.7m hasta 5m de longitud y entre 1.85m hasta 2.1m de ancho entre automóviles y camionetas.

- Motocicleta

Se eligieron 3 tipo de motocicletas estándar entre 1.8m hasta 2m de longitud y 0.68m hasta 0.85m de ancho, con ocupación estándar de ancho de carril completo, medio carril o sobre paso de su ancho disponible entre vehículos.

- Taxi

Aprovechando que se realizó una segregación en los aforos, se usó un automóvil estándar y una configuración similar.

- Autobús

Para la simulación se eligió un autobús de 9.6m de longitud y 2.8m de ancho.

- Camión pequeño

Se eligió dos modelos 3D para la representación de este tipo de vehículo, Uno posee una longitud de 9.9m de longitud y 2.5m de ancho y el otro 10.2m de longitud y 2.5m de ancho.

- Camión grande

El camión grande está representado por un tracto camión de 12m de longitud y 2.5m de ancho.

2.6.2 Geometrización del modelo

El modelo es construido con la ayuda de la ortofoto, ubicando y agregando links que encierran un área de 450m x 300m, agregando de acuerdo a las medidas reales, carriles y conexiones armando los movimientos permitidos en la intersección y entre corredores.

Figura 29. Geometría del modelo

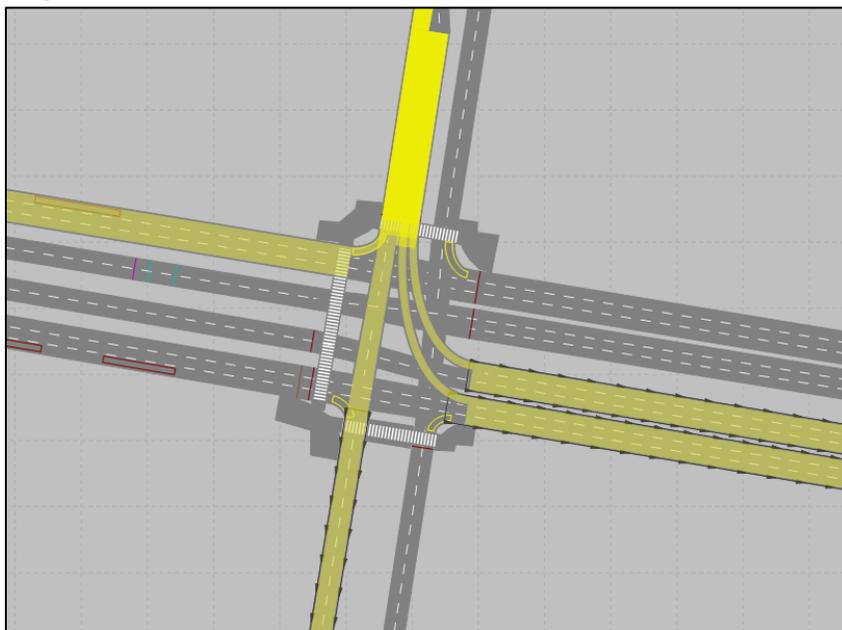


Fuente: Elaboración propia

2.6.3 Decisiones de enrutamiento

A continuación, se exponen las decisiones de enrutamiento sobre la intersección Av. Calle 100 con Av. Carrera 19, que interceden con las mediciones en la zona de paradero al costado occidental.

Figura 30. Decisión de enrutamiento de Av. Carrera 19 costado Norte



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 17 se muestra los porcentajes de flujo relativo del volumen vehicular que transita por la Av. Carrera 19 costado norte. El flujo de interés para este caso es el ítem 1 con movimiento al occidente o también movimiento a derecha de desde el norte de la Av. Carrera 19.

Tabla 17. Flujo relativo Av. Carrera 19 Costado Norte

Ítem	Movimiento	Flujo relativo
1	W	0.104
2	S	0.635
3	E-MEDIO	0.161
4	E	0.1

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 31 se presenta la decisión de enrutamiento de los vehículos que transitan por la Av. Calle 100 costado occidental.

Figura 31. Decisión de enrutamiento de la Av. Calle 100 Costado Occidental



Fuente: Elaboración propia

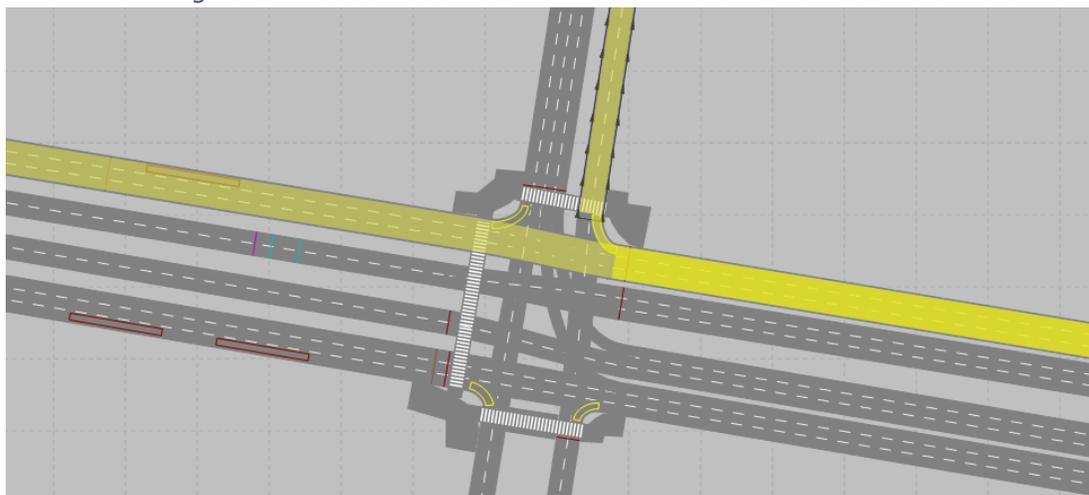
En este corredor todos los flujos son del mismo interés, si bien el 93% se mantiene sobre el corredor con movimiento E, el 13% realiza el movimiento a derecha (Tabla 18), este giro es de gran importancia para el comportamiento de zona de paraderos, que como se puede observar en la Figura 26 puede obstruir los autobuses para presentar servicio en el paradero.

Tabla 18. Flujo relativo Av. Carrera 19 Costado Norte

Ítem	Movimiento	Flujo relativo
1	S	0.13
2	E	0.8
3	E MED	0.07

Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Decisión de enrutamiento de la Av. Calle 100 Costado Oriental



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 32 se presenta la decisión de enrutamiento de la Av. Calle 100 costado Oriental y en la Tabla 19 se presenta los porcentajes del flujo relativo. Debido al bajo porcentaje del movimiento al norte, se espera que exista una mayor prolongación del flujo presente sobre este corredor al paso de la intersección.

Tabla 19. Flujo relativo Av. Calle 100 costado Oriental

Item	Movimiento	Flujo relativo
1	N	5.2%
2	W	94.8%

Fuente: Elaboración propia

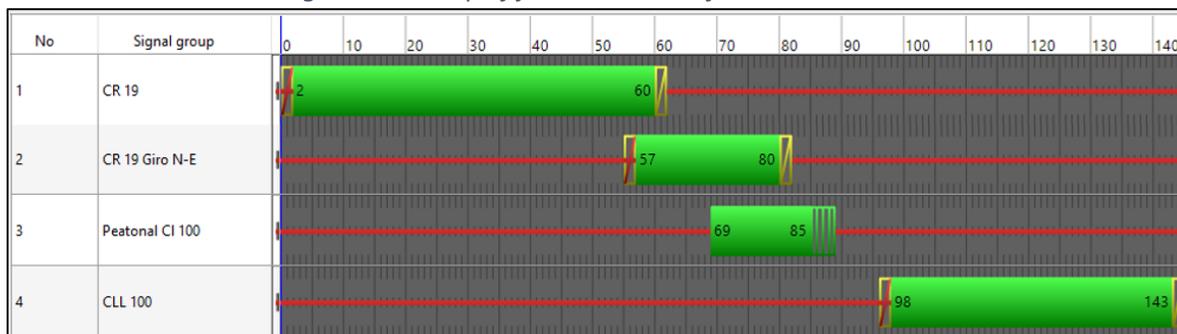
2.6.4 Volúmenes vehiculares

Los volúmenes del tráfico incorporados al modelo están enlazados con lo expuesto en el capítulo 2.4 Aforos, así como con la composición de tráfico inspeccionados en campo.

2.6.5 Ciclo semafórico

El ciclo del semáforo de la intersección de la Av. Calle 100 con Av. Carrera 19 fue medido en campo en diferentes lugares para confirmar los tiempos de cada grupo. En la Figura 33 se representa el ciclo semafórico completo con un tiempo de 145 segundos.

Figura 33. Tiempo fijo de Ciclo semafórico



Fuente: Elaboración propia

Para cada grupo de señal fue calculado un paso rojo – amarillo de 2 segundos y un amarillo único de 2 segundos. Los tiempos de verde activo para cada grupo de señal se pueden ver en la Tabla 20. Las líneas de detención están presentes de acuerdo la Figura 15.

Tabla 20. Grupo de Señal

Grupo de Señal/tiempo	Verde Activo (seg)
Av. Calle 100	45
Av. Carrera 19	58
CR19 N-E	23
Peatonal	16

Fuente: Elaboración propia

2.6.6 Implantación de paraderos

Las paradas de transporte público fueron incorporadas de acuerdo a las distancias mencionadas en el capítulo 2.2, con una longitud completa de 26m que permita como se evidencio en campo dos paradas simultaneas, sin embargo, la parada en servicio para dos BUS80 se realiza de manera individual.

En el modelo para el paradero 242A01 fue incorporada una parada de transporte público mientras que para cada módulo del paradero 212 fue incorporada su parada, esto debido a que cada módulo del paradero 212 funciona como un paradero con unas rutas del sistema asignadas y estáticas durante toda la jornada. Todas las paradas de autobús se presentan en acera ocupando el primer carril de la calzada de la Av. Calle 100.

2.6.7 Líneas de transporte público

Para la incorporación de las Rutas o Líneas de transporte público fue necesario definir los siguientes aspectos:

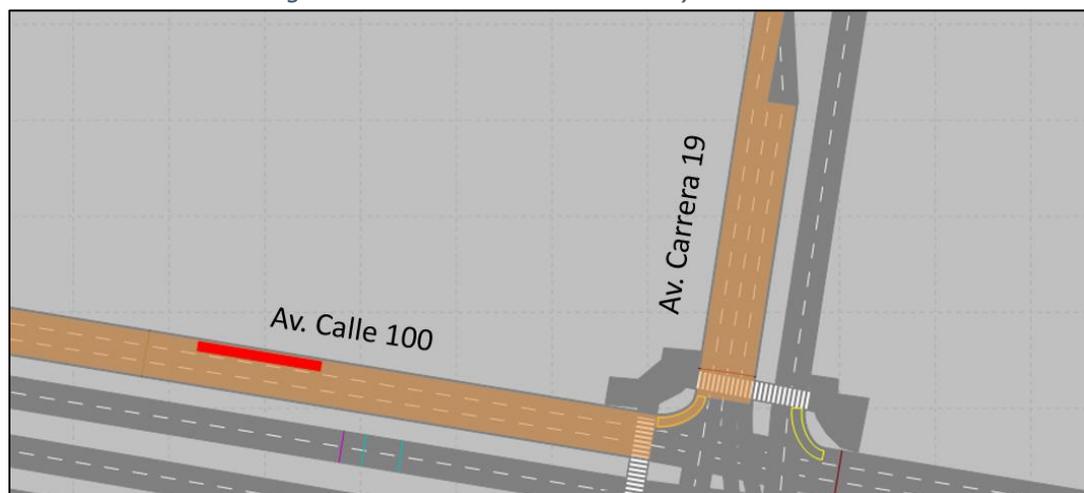
- Nombre

Los nombres de cada línea perteneciente al transporte público fueron asignados de acuerdo al nombre de la Ruta activa presentes en 2.4.1 Aforos del sistema de transporte público SITP.

- Enlace de entrada y salida (decisión de enrutamiento)

Aunque en el paradero 212 todas las rutas provienen del mismo enlace, para el paradero 242A01 las rutas tienen origen tanto de la Av. Calle 100 costado oriental como desde el giro a derecha realizado desde la Av. Carrera 19 costado norte (Figura 34).

Figura 34. Enrutamiento Línea T62 y 291



Fuente: Elaboración propia

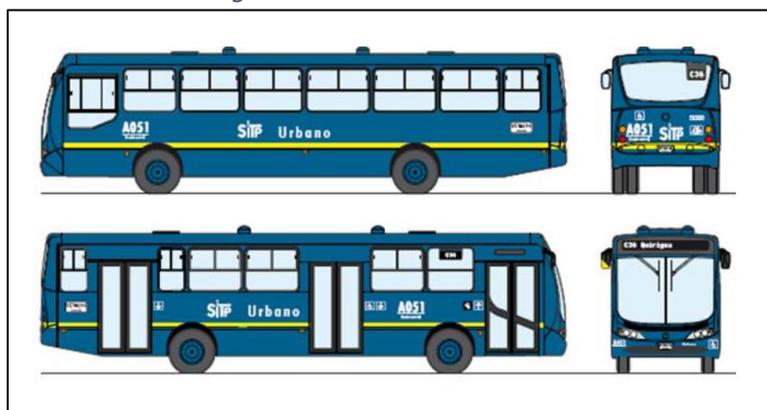
- Tipo de vehículo

Debido a que existen varios tipos de autobuses en el sistema de transporte público, como se observa en las Tabla 13 y Tabla 14, fue necesario crear dos tipos de modelos 3D que representaran dichas medidas.

El modelo del BUS 80, posee una longitud de 12.4m con un ancho de 2.6m para representar el SITP bus de 80 pasajeros como se observa en la Figura 35 y Figura 36.

El modelo estándar posee una longitud de 9.6m con un ancho de 2.4m para representar el SITP Busetón, Buseta y Microbús como se observa en la Figura 37, Figura 38 y Figura 39.

Figura 35. SITP BUS 80



Fuente: (Transmilenio, 2019)

Figura 36. Modelo BUS 80



Fuente: Elaboración propia

Figura 37. SITP Buseton 50 pasajeros – Buseta 40 pasajeros



Fuente: (Transmilenio, 2019)

Figura 38. SITP Buseton 50 pasajeros – Buseteta 40 pasajeros



Fuente: (Transmilenio, 2019)

Figura 39. Modelo Estandar



Fuente: Elaboración propia

- Activación de paradero

Para el paradero 242A01 todas las rutas son activas a la misma parada de transporte público. Para el Paradero 212 se debe asignar a cada línea el módulo o parada de transporte público en la que presenta servicio. Para implementar esta tarea se asignan de acuerdo a lo revisado en los aforos y descrito en la Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9.

- Asignación de tiempo de permanencia

Los tiempos de permanencia pueden ser incluidos directamente en el modelo, pero debido a la variedad de los mismos en cada una de las rutas fue necesario crear tiempos de distribución.

Para crear los tiempos de distribución y debido a que particularmente cada ruta posee tiempos de permanencia diferentes es necesario asignar los siguientes datos: Nombre de Línea o Ruta, promedio de tiempos de permanencia medidos en campo, desviación estándar de la muestra. En la Tabla 21 se presenta los tiempos de distribución para cada una de las rutas a partir de los tiempos de permanencia para el Paradero 242A01 y en la Tabla 22 los de las rutas del paradero 212.

Tabla 21. Tiempos de distribución - Rutas del Paradero 242A01 en segundos

RUTA	Dest	Media
37	5.9	18.8
183	2.1	15.3
200	5.7	23.8
K904	5.7	36.0
291	7.8	20.5
402	2.9	34.8
722	2.2	19.8
442	7.0	17.8
634	5.6	33.8
639	8.1	17.8
661	2.6	27.3
F404	9.0	30.7
912	0.7	15.5
193b	6.1	30.0
403a	3.4	35.6
801a	3.5	18.7
C53	1.7	14.8
E70	1.4	14.0
H606	15.5	32.4
T62	3.8	14.6
Z4B	2.1	20.3
Z8	1.0	15.5
H610	17.0	29.0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22. *Tiempos de distribución- Rutas del Paradero 212 en segundos*

Ruta	Dest	Media
37	5.82	15.25
200	11.42	19.00
291	4.22	19.60
402	14.45	25.20
442	2.88	13.40
634	3.46	17.00
661	5.86	28.33
722	0.71	17.50
193B	0.71	13.50
403A	17.94	29.33
465A	7.55	14.50
801A	4.93	10.33
A606	4.02	15.88
A610	9.40	18.40
A611	15.71	34.40
B404	3.97	13.83
B904	7.51	16.67
E70	7.88	14.86
T62	5.36	14.20
Z4B	1.71	19.75
Z8	9.42	30.00

Fuente: Elaboración propia

Los tiempos de apertura de puertas se establecieron fijos en un segundo, sin embargo, en las mediciones en sitio se revisó que en el paradero 242A01 los tiempos se aproximan más a los dos segundos. Este efecto se presenta en las repetidas verificaciones que realiza el conductor sobre el ingreso de pasajeros. Los tiempos de permanencia del Paradero 242A01 se representan en mayor medida por el abordaje de pasajeros, mientras que los tiempos de permanencia del Paradero 212 se refleja en el descenso de pasajeros.

- Horarios de llegada (Servicio)

Los horarios establecidos para las rutas en los paraderos suelen no cumplirse con precisión, sin embargo, se observó que se presentan el mismo número de paradas en la hora acordada. De esta

manera se ajustaron horarios sobre los desfases entre rutas para establecer una hora de servicio similar a los datos recolectados en sitio.

En la Tabla 23 se muestra uno de los aforos de autobuses registrando en minuto y segundo en el que se presentan los servicios durante la hora pico para el paradero 212. En el horario de servicio se encuentra desde el minuto cero hasta terminar la hora, el arribo de cada autobús de cada ruta del SITP. El número representado en cada fila es identificado por el software de la siguiente manera; de los cuatro números, los dos números de la derecha representa los segundos y los dos de la izquierda el minuto, por ejemplo, para la ruta 661 el primer autobús realizó el arribo en el segundo 47, es decir, de acuerdo con el aforo presento servicio a las 7:30:47am, mientras que el último autobús que presento servicio para la misma ruta realizó el arribo en 5828 es decir a las 8:28:28am.

Tabla 23. Horarios de Servicio – Rutas del Paradero 212

Asignación de Horarios de servicio									
37	150	1648	2402	3029	3230	3914	5355	5552	5600
200	1132	1437	3029	3751	5050	5646			
291	34	3235	4808	5413	5440	5821			
402	15	1237	1604	2100	4548	5440			
442	235	1643	2214	2715	3418	4316	4529	4725	5050
634	28	1500	3200	3434	4022	4426	4550		
661	47	2019	2037	3121	3443	3617	3849	4412	5527 5828
722	2703	5418							
193B	1345	3617	5920						
403A	510	1336	3241	3313	5129	5325			
465A	15	2222	2941	4628	5623				
801A	1348	4102	5152						
A606	418	1247	2643	3029	3337	3951	4530	5632	5900
A610	510	2446	3014	3449	4316	5050	5405		
A611	413	1853	2828	3854	4121	5440			
B404	15	1500	3047	3121	3820	3833	4550	4613	5826
B904	100	2046	2417	3615	4302	5816			
E70	809	1407	4032						
T62	1904	2541	2607	3805	4158	4832	5612	5930	
Z4B	1612	5050							
Z8	1636	1830	4646	4725	4808				

Fuente: Elaboración propia

2.6.8 Software de micro simulación

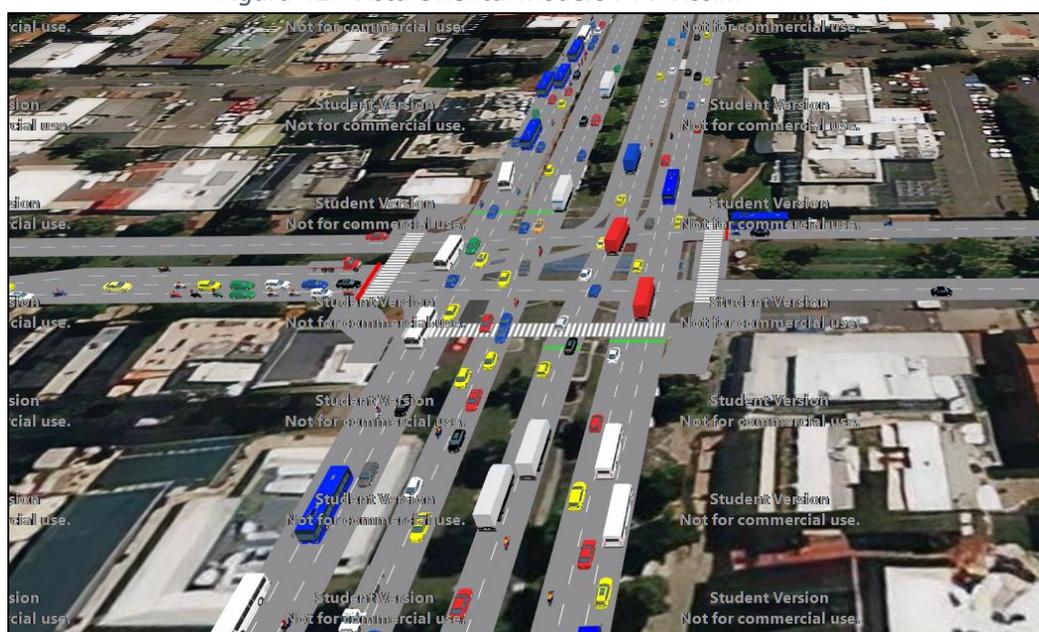
Para realizar el modelo de micro simulación o también llamado simulación microscópica se ha tomado el software Vissim desarrollado por PTV (Planung Transport Verkehr), aprovechando las bondades de los objetos de red como las paradas y líneas de transporte público, así como las facilidades en intersecciones.

Figura 40. Vista Noroccidental modelo PTV Vissim



Fuente: Elaboración propia

Figura 41. Vista Oriental modelo PTV Vissim



Fuente: Elaboración propia

2.6.9 Calibración del modelo

El propósito principal de la calibración es mejorar la confiabilidad de los datos registrados en el software con el aportado y suministrado a partir de los aforos. Para calibrar el modelo se utiliza el GEH que es un indicador que compara el volumen horario obtenidos en campo (C) contra los volúmenes horarios medidos en el modelo (M) para determinar el nivel de error. Se considera tanto la proporción como la magnitud del error, en términos generales se considera apropiado tener un GEH menor a 5.

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M - C)^2}{M + C}}$$

Los dos puntos de medición se encuentran en la zona de paraderos, que de acuerdo a las mediciones en campo y lo reportado por el modelo, se dan los siguientes resultados para GEH.

- Mediciones sentido E-W

Volumen en campo C = 1362

Volumen contabilizado en el modelo M = 1341

$$GEH=0.57$$

- Mediciones sentido W-E

Volumen en campo C = 1362

Volumen contabilizado en el modelo M = 1341

$$GEH=0.86$$

3. ANÁLISIS DE CAPACIDAD VIAL

3.1 Escenarios de variación

Para realizar el análisis de comportamiento del tráfico vehicular en efecto de las paradas del sistema de transporte público SITP Urbano sobre los paraderos 242A01 y 21200 de la Av. Calle 100 con Av. Carrera 19 se realizaron las siguientes variaciones en el número de Rutas, así como volúmenes de tráfico porcentualmente de acuerdo a lo registrado en campo.

Tabla 24. Variación de los volúmenes de tráfico aplicado a cada escenario

Variación de Volúmenes de tráfico					
E-W	-10%	0%	10%	20%	30%
W-E	-15%	0%	15%	30%	45%

Fuente: Elaboración propia

3.1.1 Escenario 1 (base)

Se contempla como escenario base: el corredor eliminando los paraderos 242A01 y 21200, eliminando los autobuses del sistema y realizando variaciones porcentuales del volumen de tráfico en los links 3 y 5 correspondientes a la Av. Calle 100 flujo E-W calzada exterior y flujo W-E calzada exterior respectivamente.

3.1.2 Escenario 2

Para el paradero 242A01 se incorpora la zona de parada con la detención de 3 Rutas o Líneas del SITP de acuerdo con los datos suministrados en el capítulo 2. Igualmente, para el paradero 212 se incorpora el módulo A01 agregando 3 de las 6 rutas de este módulo. Se aplica la variación de volúmenes de la Tabla 24.

3.1.3 Escenario 3

Con las rutas incluidas en el escenario 2 se agregan 3 rutas más al paradero 242A01, igualmente para el paradero 212 modulo A01 se agregan las siguientes 3 para completar las rutas pertenecientes a este módulo. Se aplica la variación de volúmenes de la Tabla 24.

3.1.4 Escenario 4

Con las 6 rutas incluidas en el escenario 3 para el paradero 242A01 se agregan las siguientes 3 para completar un total de 9 rutas en servicio. Para el paradero 212 el módulo A01 se encuentra con sus rutas completas y se agregan las primeras 3 rutas y apertura del módulo B01. Se aplica la variación de volúmenes de la Tabla 24.

3.1.5 Escenario 5

A las 9 rutas incluidas en el escenario 4 para el paradero 24201 se agregan los siguientes 3 para completar un total de 12 rutas en servicio. Para el paradero 212 Se agregan 3 rutas más al módulo B01 con un total de 6 y el módulo A01 completo. Se aplica la variación de volúmenes de la Tabla 24.

3.1.6 Escenario 6

Para este escenario el paradero 242A01 posee 15 rutas en servicio. El paradero 212 posee el módulo A01 completo con 6 rutas y el módulo B01 completo con sus 9 rutas en servicio. Se aplica la variación de volúmenes de la Tabla 24.

3.1.7 Escenario 7

Para este escenario el paradero 242A01 completa un total de 18 rutas en servicio. El paradero 212 incorpora el módulo A01 y modulo B01 completos y agrega el módulo C01 con las primeras 3 rutas. Se aplica la variación de volúmenes de la Tabla 24.

3.1.8 Escenario 8

Este escenario presenta el modelo completo con la incorporación de todas las rutas del sistema en el paradero 242A01 y el paradero 212 con todos sus módulos completos. Se aplica la variación de volúmenes de la Tabla 24.

A continuación, se presenta en la Tabla 25 el resumen de escenarios para cada paradero.

Tabla 25. Variación de los volúmenes de tráfico aplicado a cada escenario

Escenario	242A01	212		
		Modulo A	Modulo B	Modulo C
1	No Activo	No Activo	No Activo	No Activo
2	3	3	No activo	No activo
3	6	6	No activo	No activo
4	9	6	3	No activo
5	12	6	6	No activo
6	15	6	9	No activo
7	18	6	9	3
8	21	6	9	6

Fuente: Elaboración propia

Para cada escenario de la Tabla 25 se crean 5 escenarios más con las variaciones de volúmenes de la Tabla 24 aportados en las calzadas de interés manteniendo la composición vehicular.

3.2 Análisis de Tiempos de Viaje

Los tiempos de viaje fueron tomados sobre las calzadas de interés y para 3 movimientos atendiendo a cada uno de los escenarios y variaciones de volúmenes. Los puntos de control fueron agregados al modelo como lo muestra la Figura 42 y en las coordenadas de la Tabla 26.

Figura 42. Puntos de control para tiempos de viaje



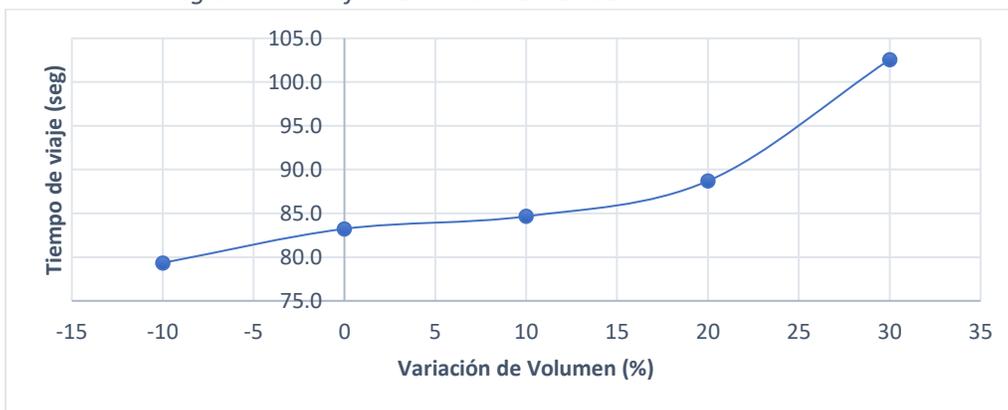
Fuente: Elaboración propia

Tabla 26. Coordenadas Puntos de Control

Punto de Control	N	E
A	109908.422	103024.092
A1	109972.667	102645.453
B	109945.030	102567.898
B1	109872.432	103009.534
B2	109806.006	102797.059

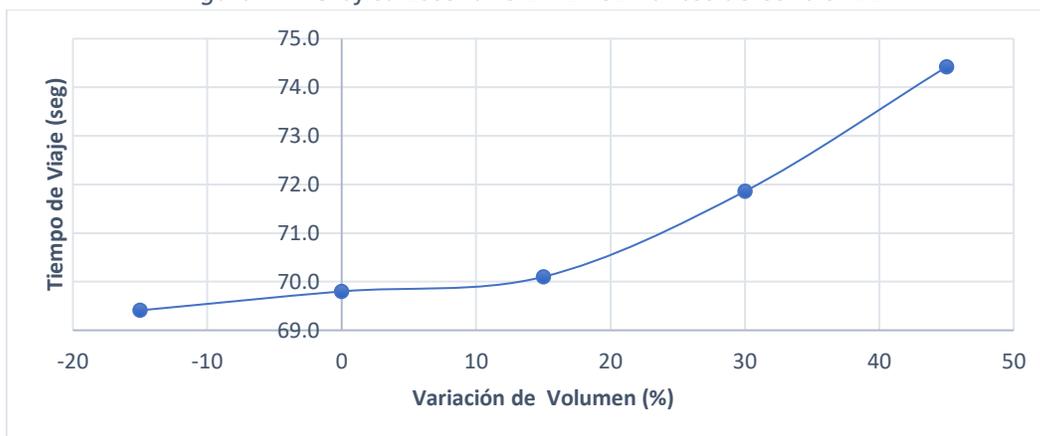
Para verificar el comportamiento base del modelo con respecto a las variaciones porcentuales del volumen de tráfico, se han extraído los datos de los tiempos de viaje para el Escenario 1 y mantener una comparativa progresiva con los siguientes escenarios. En la Figura 43, Figura 44 y Figura 45 se presentan las gráficas de tiempo de viaje para el escenario 1 con respecto a las variaciones de volumen.

Figura 43. Grafica Escenario 1 – BASE Puntos de Control A



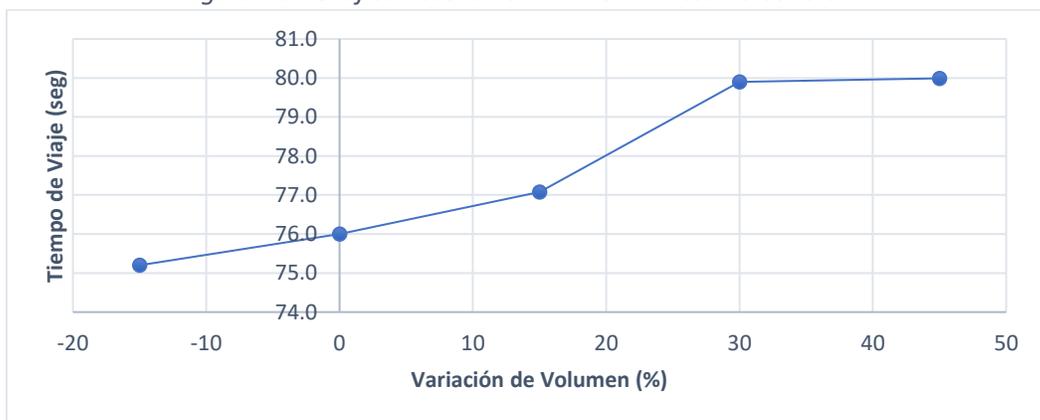
Fuente: Elaboración propia

Figura 44. Grafica Escenario 1 – BASE Puntos de Control B1



Fuente: Elaboración propia

Figura 45. Grafica Escenario 1 – BASE Puntos de Control B2



Fuente: Elaboración propia

Los tiempos de viaje para cada punto de control con las diferencias porcentuales de la Tabla 24 presentan diferentes comportamientos a tener en cuenta en los resultados arrojados en los posteriores escenarios. La Base de puntos de control A, muestran diferencias muy bajas con el aumento del 20% del tráfico, este comportamiento se debe principalmente al tiempo de señal de paso en la intersección, que como se muestra en la Figura 12 se mantiene un valor volumen/capacidad menores o muy cercanos a 1. Posteriormente con la incorporación de 1589 vehículos mixtos/hora, se presenta una relación v/c por encima de 1, evitando que toda la cola del semáforo pase en el mismo ciclo provocando el aumento imperioso de los tiempos de viaje.

Para los puntos de control B, se muestra una baja sensibilidad con el aumento del volumen hasta un 15%, posterior a este con la incorporación de 1201 y 1340 vehículos/hora se presenta aumentos importantes en los tiempos de viaje por las siguientes razones: El aumento provocado en el 30% del volumen base y superior es inducido por la relación volumen/capacidad en la señal de paso en la intersección, por otra parte, este corredor a comparación de los puntos de control A posee un mayor flujo relativo para el giro a derecha con destino a la Av. Calle 19.

3.2.1 Paradero 242A01

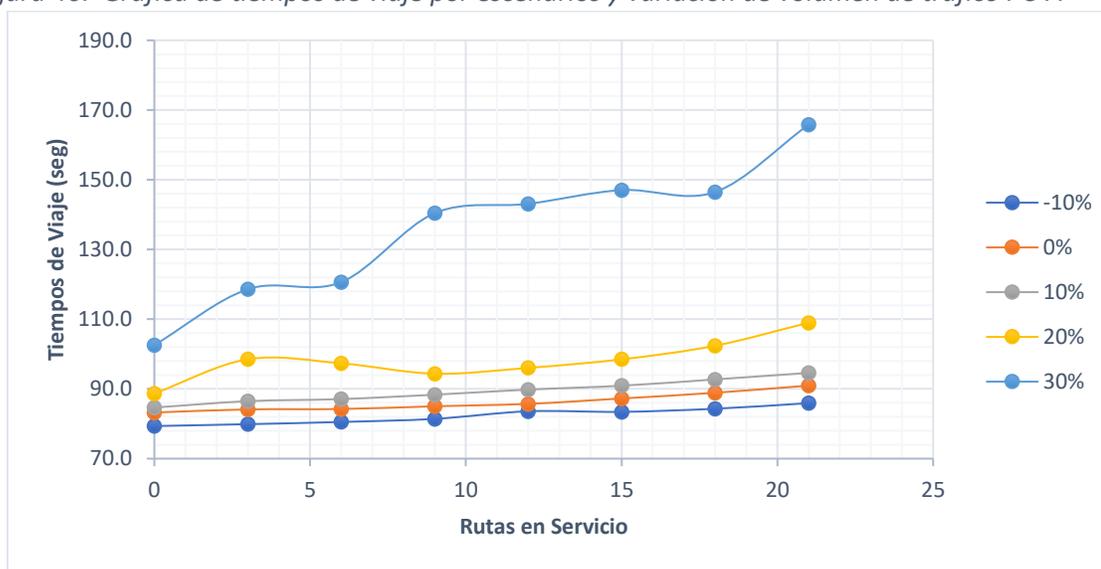
En la Tabla 27 se presentan los resultados para el Punto de Control A referente al paradero 242A01, realizando micro simulaciones para cada escenario y realizando la variación del tráfico, los resultados se obtienen en segundos.

Tabla 27. Tiempos de viaje Punto de Control A con variación de tráfico y numero de rutas.

Variación de Tráfico %	Numero de rutas en servicio							
	0	3	6	9	12	15	18	21
-10	79.34	79.89	80.52	81.41	83.58	83.42	84.32	85.92
0	83.23	84.12	84.24	85.02	85.71	87.26	88.9	90.96
10	84.66	86.48	87.09	88.35	89.81	90.92	92.73	94.6
20	88.70	98.51	97.34	94.37	96.04	98.49	102.39	108.97
30	102.57	118.6	120.64	140.42	143.1	147.04	146.49	165.8

Fuente: Elaboración propia

Figura 46. Grafica de tiempos de viaje por escenarios y variacion de volumen de trafico PC-A



Fuente: Elaboración propia

Como es de esperarse la variación de volumen al +30% presentaría diferencias más contundentes con respecto a las otras variaciones, este caso representa escenarios con intersecciones saturadas al que se le suma el sistema de transporte público.

Analizando las otras variaciones se marca un evidente ascenso en los tiempos de viaje del tráfico mixto a medida que se agregan rutas al sistema. En la Tabla 28 se presenta un resumen del crecimiento de la demora para el paradero 242A01 para cada variación de tráfico en el total de los escenarios.

Tabla 28. Crecimiento de los tiempos de viaje de todos los escenarios punto de control A

Variación de tráfico %	Incorporar Paradero	Demora promedio por escenario	Demora total
-10	0.69%	1.15%	8.29%
0	1.07%	1.28%	9.29%
10	2.15%	1.60%	11.74%
20	11.06%	3.08%	22.85%
30	15.63%	7.32%	61.65%

Fuente: Elaboración propia

Revisando linealmente los resultados de crecimiento de los tiempos de viaje para todos los escenarios y de acuerdo a la gráfica base para este punto de control en la Figura 43, podría determinarse que para un paradero que se encuentra posterior a una intersección semaforizada la demora del tráfico mixto es relativamente baja fijando un crecimiento entre el 1 y 3% por cada 3 rutas del SITP, entre 1% y 2% en incorporar un paradero con 3 rutas y un aumento completo desde la base hasta incorporar las rutas en servicio del 8% hasta el 12%.

3.2.2 Paradero 212

De acuerdo con los escenarios planteados, el análisis de los tiempos de viaje se realiza progresivamente incorporando rutas para completar cada módulo del paradero empezando por el módulo A00. Los resultados están dados para los puntos de Control B hasta B1 y B2.

Tabla 29. Tiempos de viaje Punto de Control B1 con variación de tráfico y numero de rutas

Variación de tráfico %	Numero de rutas en servicio							
	0	3	6	9	12	15	18	21
-15	75.2	76.1	77.4	77.7	78.5	79.2	80.5	80.7
0	76.0	78.1	79.2	80.2	80.8	82.3	83.4	83.5
15	77.1	80.1	80.6	81.3	83.2	84.2	84.4	84.1
30	79.9	82.0	82.0	83.8	85.3	85.3	86.5	87.1
45	80.0	82.6	82.7	84.5	85.6	87.7	88.0	89.1

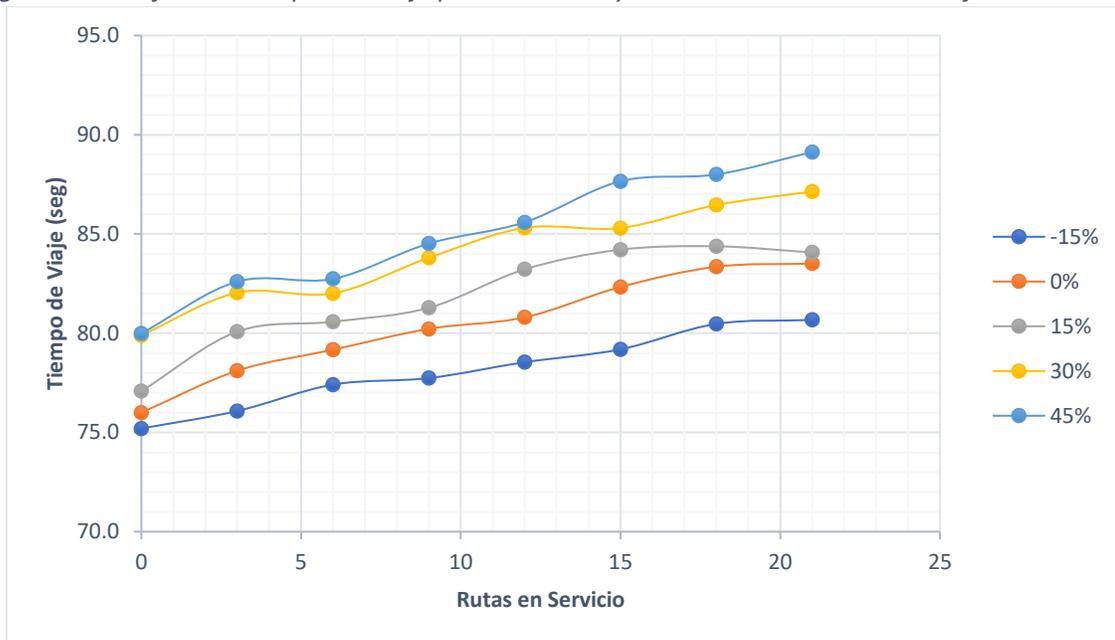
Fuente: Elaboración propia

Tabla 30. Tiempos de viaje Punto de Control B2 con variación de tráfico y numero de rutas

Variación de tráfico %	Numero de rutas en servicio							
	0	3	6	9	12	15	18	21
-15	69.4	76.6	78.7	82.4	83.2	83.4	84.1	84.6
0	69.8	76.8	79.8	82.5	83.7	84.7	85.0	85.2
15	70.1	77.1	82.1	83.2	84.7	87.7	89.0	91.7
30	71.9	78.1	84.0	84.9	87.0	91.5	91.6	92.3
45	74.4	87.3	92.6	92.3	95.0	99.7	101.2	100.1

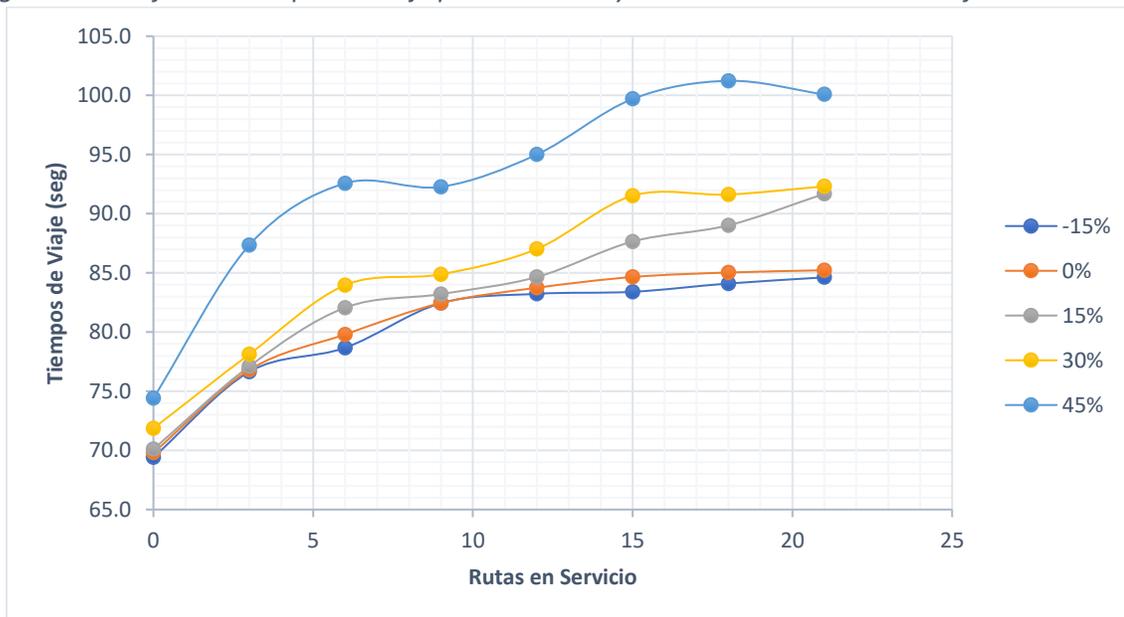
Fuente: Elaboración propia

Figura 47. Grafica de tiempos de viaje por escenarios y variacion de volumen de trafico PC-B1



Fuente: Elaboración propia

Figura 48. Grafica de tiempos de viaje por escenarios y variacion de volumen de trafico PC-B2



Fuente: Elaboración propia

La incorporación de las rutas para los puntos de control B1 muestran aumentos constantes y similares en todas las variaciones a medida que se agregan rutas y se completan los módulos del paradero. Aun el aumento del +45% en la base de aforo puede no ser significativamente crítico para la señal de paso semafórica puesto que la Figura 44 muestra un cambio total de apenas 4.6 segundos.

El punto de control B2 por otra parte exhibe un cambio más marcado en los tiempos de viaje para el giro a derecha en los dos primeros puntos. El resultado de esta exposición está relacionado con las rutas que presentan servicio en el Módulo A00, el cual es el primero en completar las rutas, de acuerdo con la Figura 19 al estar este módulo más cercano a la intersección se presenta una interacción con el tráfico mixto y las detenciones con eventuales mayores presencia de autobuses sobre el carril.

Otra indicación importante en los aumentos más significativos para el punto de control B2 es la presencia de vehículos en el carril derecho hasta la zona de paradero del módulo A00 como se observa en la Figura 26, efecto que retrasa la posición y servicio de las rutas de este módulo, aumentando evidentemente los tiempos de viaje tanto de los autobuses del sistema como del tráfico mixto que desea ocupar este carril antes de la señal semafórica para ejecutar el giro a derecha con destino a la Av. Carrera 19.

En la Tabla 31 se presenta un resumen del crecimiento de la demora para el paradero 212 para cada variación de tráfico en el total de los escenarios representando el punto de control B1, es decir, los vehículos que continúan recto hacia el oriente sobre la Av. Calle 100.

Tabla 31. Crecimiento de los tiempos de viaje de todos los escenarios punto de control B1

Variación de tráfico %	Incorporar Paradero	Demora promedio por escenario	Demora total
-15	1.17%	1.01%	7.27%
0	2.78%	1.36%	9.88%
15	3.89%	1.26%	9.07%
30	2.68%	1.25%	9.06%
45	3.26%	1.56%	11.43%

Fuente: Elaboración propia

Analizando particularmente los tiempos de viaje por escenario para el punto de control B1, se obtiene un aumento progresivo entre 1% y 1.6% por escenario, un aumento entre 1.2% y 3.3% en la incorporación del primer módulo con solo 3 rutas y una demora total estimada con el funcionamiento completo de todos los módulos entre 10% y 11.5%.

Es importante comparar este crecimiento cuando se presenta un paradero multi modal y cuando se presenta un único paradero, así mismo cuando este se presenta antes o después de la intersección semaforizada. Si se compara los crecimientos porcentuales del tráfico sobre el aforo, los valores de +10% de los puntos de control A con 1344 vehículos/h podría solo compararse con los valores de +45% del punto de control B con 1340 vehículos/hora, los cuales presentan aumentos muy similares al 11.5%.

En la Tabla 32 se presenta un resumen del crecimiento de la demora para el paradero 212 para cada variación de tráfico en el total de los escenarios representando el punto de control B2, es decir, los vehículos que realizan el giro a derecha desde la Av. Calle 100 hacia la Av. Carrera 19.

Tabla 32. Crecimiento de los tiempos de viaje de todos los escenarios punto de control B2

Variación de tráfico %	Incorporar Paradero	Demora promedio por escenario	Demora total
-15	10.42%	2.93%	21.91%
0	10.03%	2.94%	22.09%
15	9.99%	3.95%	30.78%
30	8.71%	3.69%	28.46%
45	17.36%	4.48%	34.48%

Fuente: Elaboración propia

Para este movimiento se presenta mayor demora en el tráfico que realiza el giro a derecha en todos los aspectos. Con esto se confirma que debido a las detenciones que presentan sobre el carril que eventualmente ocupa el tráfico mixto para realizar el giro a derecha los tiempos de viaje resultan mayores en efecto con la interacción de la señal de paso en la intersección.

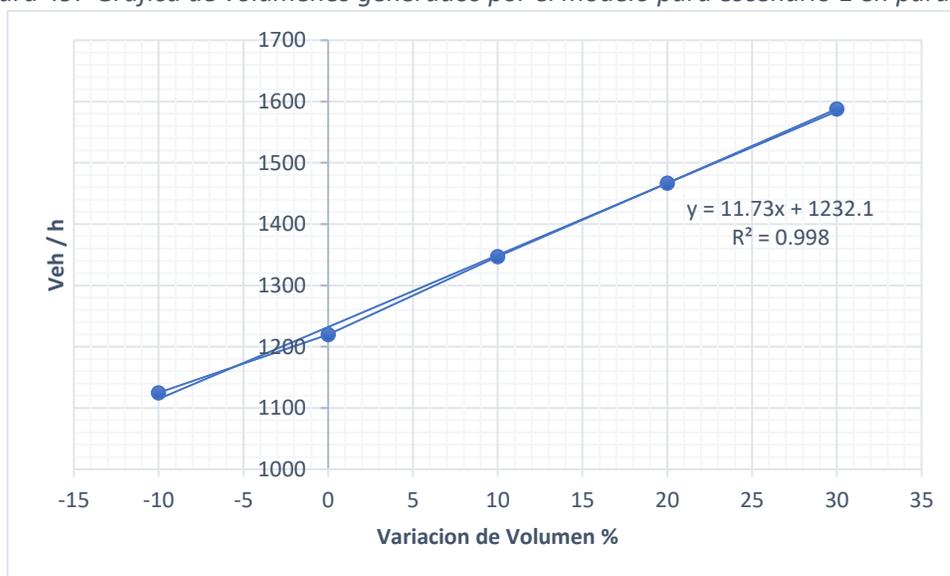
Aunque la demora promedio para cada variación de tiempo se estima entre 3% y 4.5%, de acuerdo a lo expuesto en la gráfica resultante de los tiempos de viaje en la Figura 48, los aumentos más significativos son en el momento de incorporar un paradero tan cercano a la intersección, aumentando desde un 10.5% hasta un 17.5%. Las demoras totales de acuerdo a los volúmenes de tráfico son bien representadas informando un aumento de las demoras en todo el sistema desde 22% hasta un 35%.

3.3 Análisis De Capacidad

Para iniciar con el análisis de capacidad generados en los modelos de micro simulación, se indican los valores de variabilidad del volumen generado en las calzadas de interés con respecto a los resultados de volúmenes generados en la hora y comprobar que su comportamiento sea uniforme manteniendo un crecimiento similar a lo indicado en la Tabla 24.

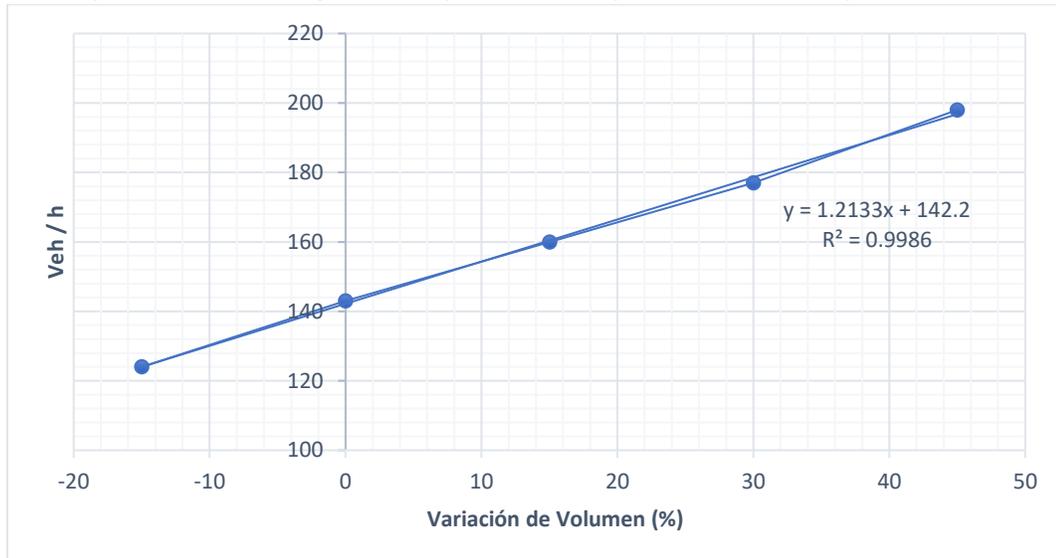
En la Figura 49, Figura 50 y Figura 51, se muestran los resultados de volúmenes en el escenario 1, representando la variación de volúmenes para cada modelo. Estas graficas es la base para la identificación y comparación de los resultados de capacidad para cada escenario.

Figura 49. Grafica de volúmenes generados por el modelo para escenario 1 en paradero 242A01



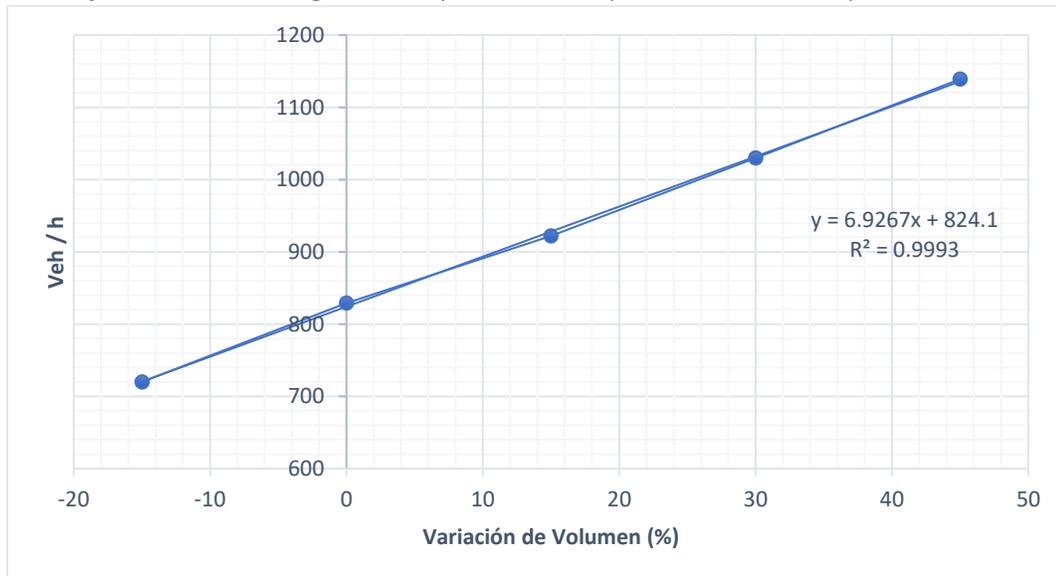
Fuente: Elaboración propia

Figura 50. Grafica de volúmenes generados por el modelo para escenario1 en paradero 212 W-S



Fuente: Elaboración propia

Figura 51. Grafica de volúmenes generados por el modelo para escenario 1 en paradero 212 W-E

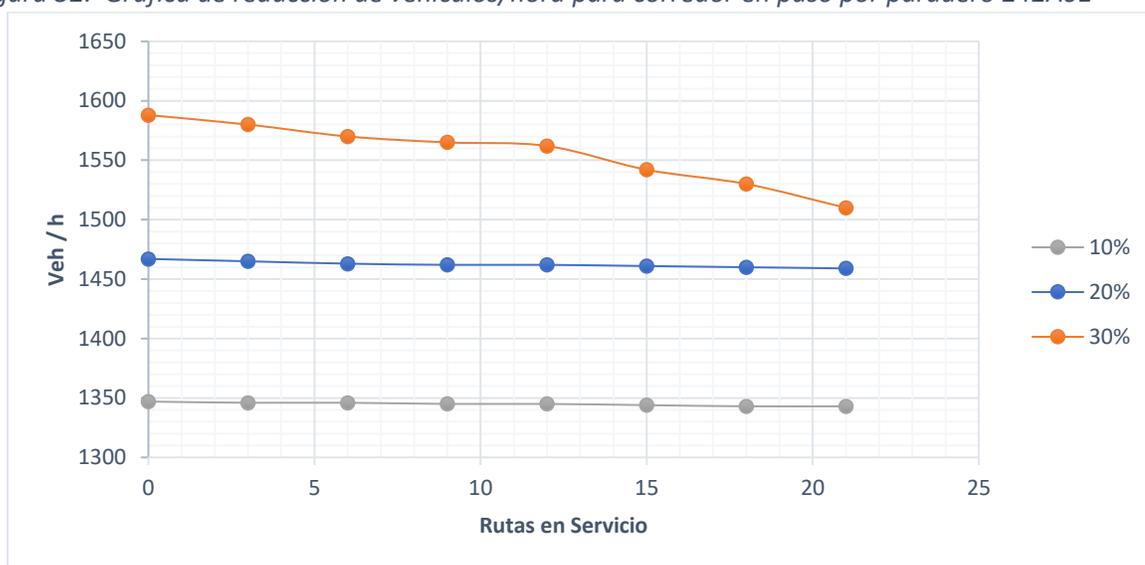


Fuente: Elaboración propia

Cada grafica representa linealmente el aumento en variación porcentual contra el volumen arrojado por el modelo manteniendo en el paradero 242A01 un crecimiento uniforme entre el 8% y 10%,

para los puntos de control del paradero 212 se tiene un crecimiento del 15% para los primeros datos y posteriormente se ajusta entre un 11 y 12%. Al presentar un crecimiento lineal y acorde con la variación del volumen se pueden usar estos datos al momento de verificar los resultados de número de vehículos que transitan y finalizan el sistema.

Figura 52. Grafica de reduccion de vehiculos/hora para corredor en paso por paradero 242A01



Fuente: Elaboración propia

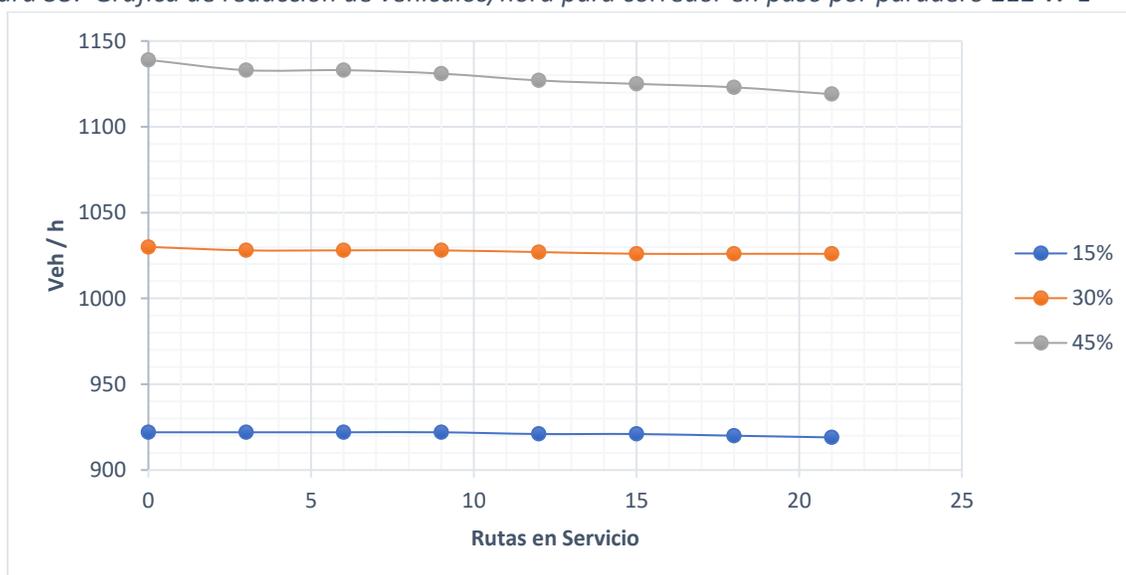
La anterior grafica representa la reducción de vehículos mixtos en el corredor de la Av. Calle 100 sentido oriente occidente, atravesando la intersección con la Av. Calle 19 y posteriormente pasando por el paradero 242A01.

Se ha representado las variaciones en volumen de tráfico que muestran reducciones, en este caso para un aumento del 10%, 20% se presentan reducciones mínimas, mientras que para un aumento del 30% del tráfico mixto se presentan reducción moderadas, sin embargo, como se observó en la Figura 43, estas reducciones suelen estar más afectadas por la interacción del corredor con la señal de paso en la intersección que por la presencia del paradero, por lo que volúmenes entre el 20% y 30% representan una relación v/c mayor o muy cercana a 1.

Entendiendo que +30% en la variación de volumen es decir 1589 vehículos/hora se ven afectados por los 45 segundos de señal activa para paso en la intersección, el efecto que provoca la presencia del paradero y la detención de 21 rutas se puede representar como mínimo sobre los +20% es decir 1466 vehículos hora, donde solo afectaría la capacidad del corredor en un 0.55%.

En la Figura 53 se presenta la gráfica de reducción de vehículos/hora para el corredor de la Av. Calle 100 sentido occidente oriente en el paso por el paradero 212 con módulos A00, B00 y C00 representando aumento de rutas y módulos del sistema en servicio.

Figura 53. Gráfica de reducción de vehículos/hora para corredor en paso por paradero 212 W-E

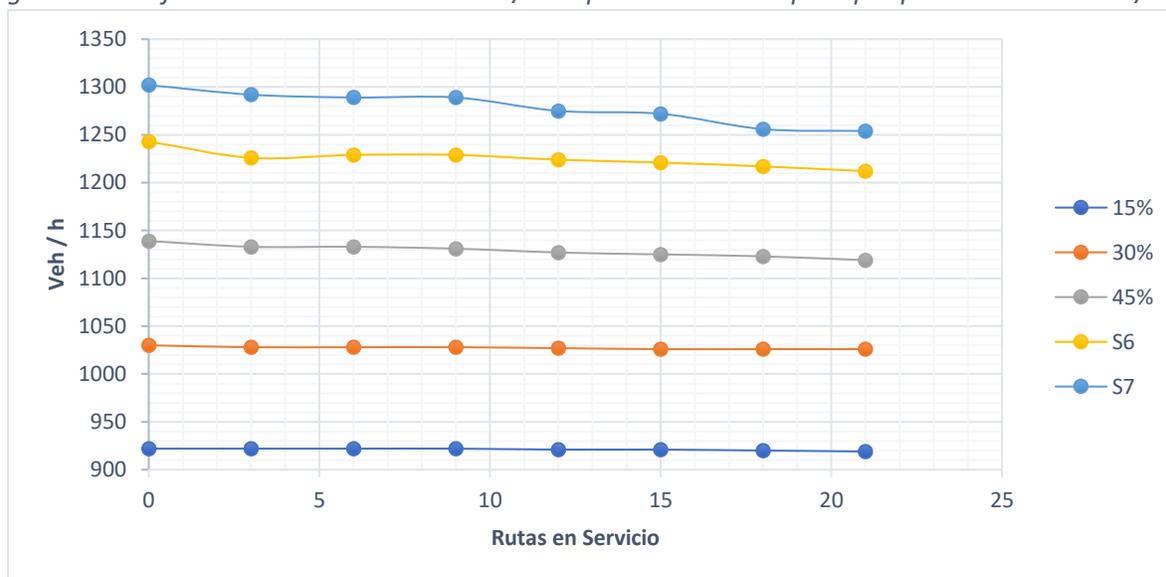


Fuente: Elaboración propia

Las reducciones más evidentes de la capacidad se observan sobre la línea +45% con 1340 vehículos hora, aun así, este volumen puede estar 250 vehículos/hora por debajo de una relación v/c cercana al 1 para el paso de la señal semafórica. Por lo que se realiza los siguientes cálculos y estimaciones.

Con el ideal de poder acercarse a una relación de volumen/capacidad para la intersección, se ha realizado nuevas modelaciones aumentando los volúmenes para este corredor y revisar el comportamiento de las paradas del sistema de transporte público sobre la capacidad de todo el tráfico mixto.

Figura 54. Grafica de reduccion de vehiculos/hora para corredor en paso por paradero 212 W-E $v/c \approx 1$



Fuente: Elaboración propia

Para las curvas S6 y S7, correspondientes a las modelaciones con 1478veh/h y 1562veh/h representadas en la Figura 54, para valores de volumen/capacidad muy cercanos o menores a 1 y muy cercanos y mayores a 1 respectivamente, las incidencias del paradero 212 sobre el tráfico mixto del corredor son más evidentes. Desde el punto base hasta incorporar rutas a cada uno de los módulos hasta completar el sistema de paradas. En la Tabla 33 se presentan los resultados de disminución de capacidad general por efecto de la incorporación completa del Paradero 212 al corredor.

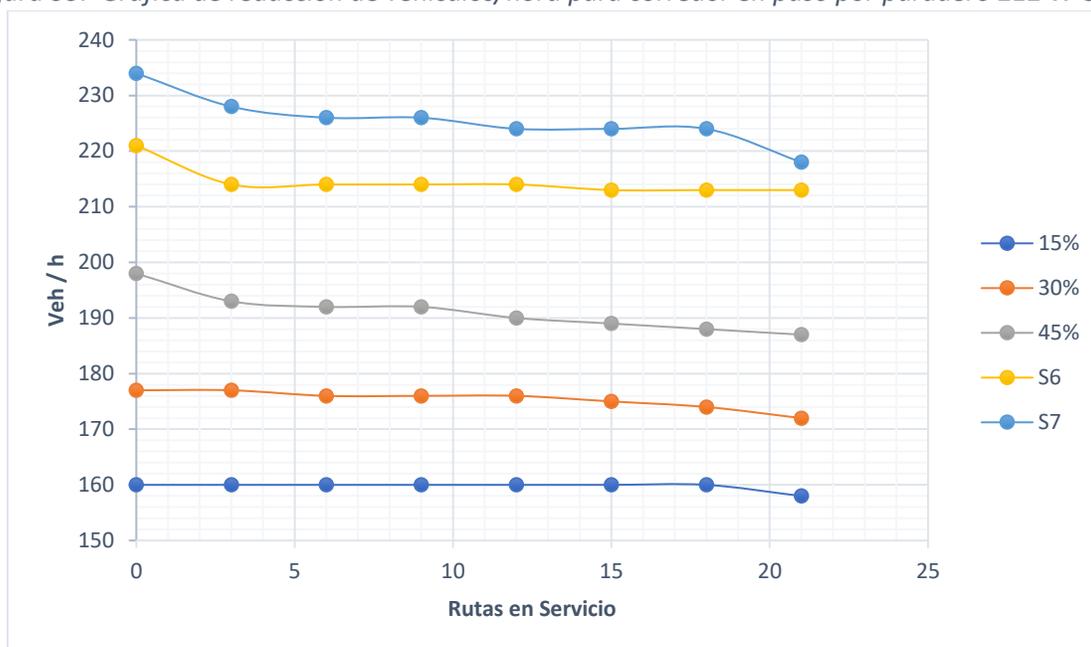
Tabla 33. Disminución de la capacidad en efecto de paradero 212 Punto de control B1

Modelo	Veh / h	Disminución de Capacidad
S + 15%	1063	0.33%
S + 30%	1201	0.39%
S + 45%	1340	1.76%
S6	1478	2.49%
S7	1562	3.69%

Fuente: Elaboración propia

Con el aumento del volumen de tráfico aproximado a una relación v/c de 1 a la señal de paso en la intersección, se puede observar una mayor afectación de la capacidad a todo el corredor con la incorporación completa de todo el paradero 212 y sus módulos A00, B00 y C00. Se estima que la reducción de la capacidad es mayor si se presenta un flujo ideal para la intersección en correspondencia con el volumen necesario para alcanzar dicha relación. En general y como se observa en la Tabla 33, la reducción de la capacidad es directamente proporcional al volumen de tráfico en el corredor y admisible para la señal de paso.

Figura 55. Grafica de reduccion de vehiculos/hora para corredor en paso por paradero 212 W-S



Fuente: Elaboración propia

Se estima que la reducción de la capacidad para el punto de control B1 en efecto del paradero con servicio completo actúe entre un mínimo de 2.5% hasta 3.7% para una relación v/c cercana a 1.

En la Figura 55 se presenta la reducción de vehículos/hora para el punto de control B2 giro a derecha desde la Av. Calle 100 sentido occidente oriente hasta la Av. Carrera 19 hacia el Sur.

Las reducciones son más abruptas en el primer punto donde se realiza la incorporación de 3 rutas al Módulo A00, la incidencia de esta reducción puede presentarse en cualquier punto donde se complete el Módulo A00 especialmente porque se incorporan las rutas B904, A611, 465A, y 291 desde el punto 1 hasta el punto 3, puesto que son las Rutas que realizan el mismo movimiento de giro a derecha. Posteriormente las reducciones son considerablemente menores pero progresivas por la incorporación de las rutas en servicio especialmente del Módulo B00.

Tabla 34. Disminución de la capacidad en efecto de paradero 212 Punto de control B2

Modelo	Vehículos	Disminución de Capacidad
S + 15%	1063	1.25%
S + 30%	1201	2.82%
S + 45%	1340	3.62%
S6	1478	5.56%
S7	1562	6.84%

Fuente: Elaboración propia

La disminución de la capacidad está directamente relacionada con el evento de paradas que se presenten principalmente en el Módulo A00 por estar tan cercano a la intersección, esto por supuesto con todos sus componentes de frecuencia y tiempos de permanencia particulares de cada Ruta.

Se estima que la reducción de capacidad para un giro en intersección que no presente carril adicional, manteniendo el primer carril para el movimiento con un módulo de paradero cercano con al menos 4 rutas y 27 autobuses /h en servicio que realizan el movimiento y posteriores servicios en acera, un flujo del 13% del corredor, puede establecerse desde un 3.6% hasta 6.8% con las mismas

consideraciones de volúmenes cercanos a una relación volumen/capacidad cercana a 1.

Consecutivamente el efecto de agregar rutas en servicio a los Módulos del paradero aumenta levemente la disminución de la capacidad.

3.4 Análisis De Niveles De Servicio

Los resultados para este análisis consideran la obtención de los parámetros de (A-F) para la medición del nivel de servicio basados en los tiempos de detenciones o disminución de velocidad provocadas por la interacción del volumen de tráfico frente a la intersección y los efectos de las detenciones de los Autobuses del Transporte Público de Pasajeros en los paraderos y módulos correspondientes.

Por consiguiente, serán analizados los resultados de los retrasos de los vehículos en cada uno de sus puntos de control y movimientos en la red. El retraso de todos los vehículos es medido de la siguiente forma:

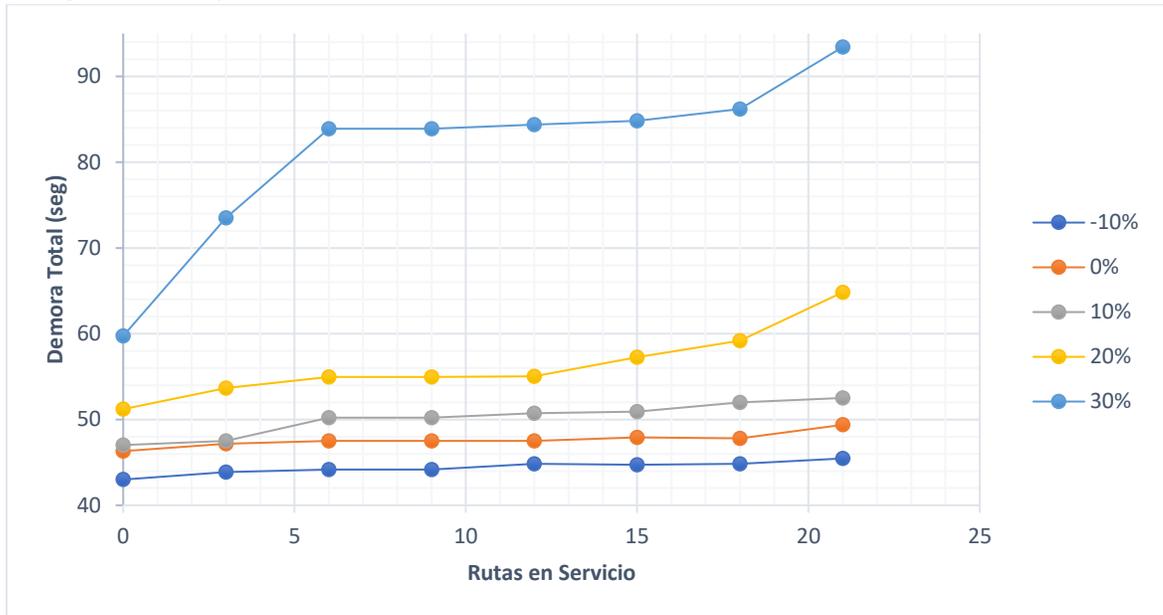
La demora de cada vehículo al salir de una medición de tiempo de recorrido se obtiene restando el tiempo de viaje teórico o ideal del tiempo de viaje real.

El tiempo de viaje teórico es el tiempo de viaje que podría lograrse si no hubiera otras razones para que se presenten detenciones o disminución de velocidad.

Para este análisis se tiene en cuenta las zonas de velocidad reducida producidas por cambio de carril o giro permitido dentro de la red.

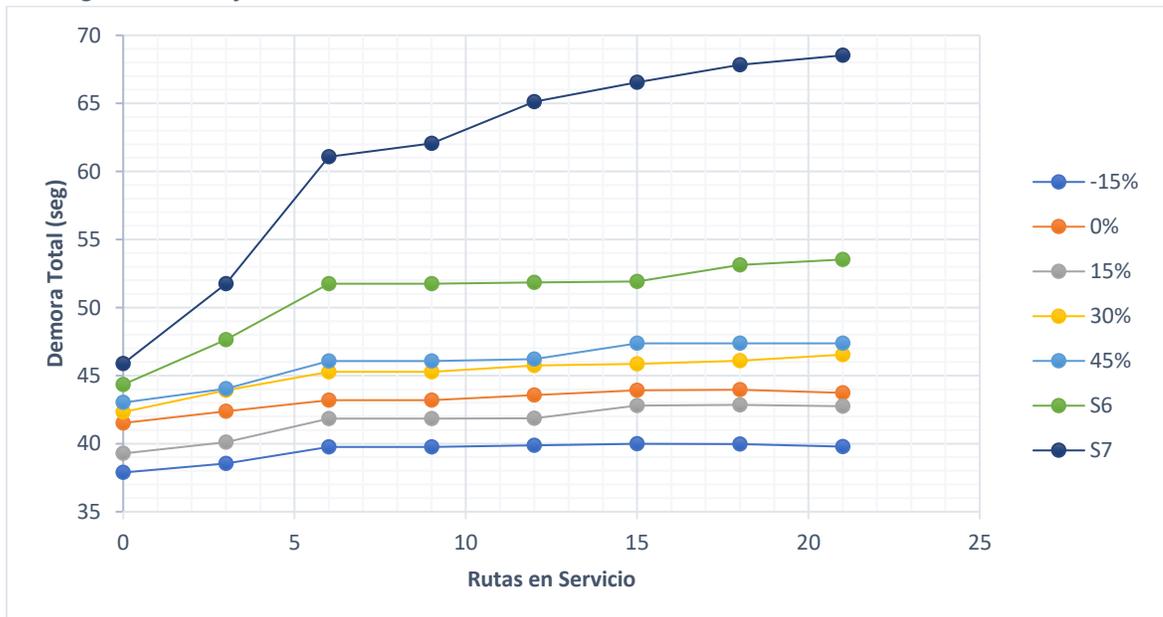
Para que se presente un análisis efectivo el tiempo de viaje real no incluye el tiempo de servicio de los autobuses del sistema de transporte público, pero si incluye el retraso debido al frenado antes de una parada de transporte público; o la incorporación y aceleración después del servicio de una parada de autobuses del sistema son parte del retraso.

Figura 56. Grafica de retraso de vehiculos en Paradero 242A01 Punto de Control A



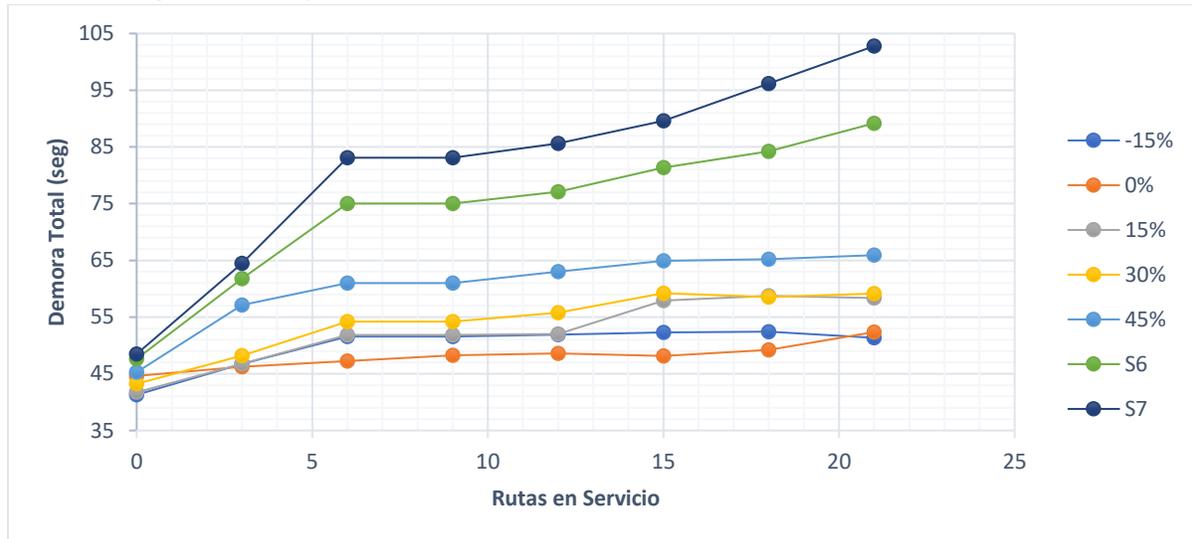
Fuente: Elaboración propia

Figura 57. Grafica de retraso de vehiculos en Paradero 212 Punto de Control B1



Fuente: Elaboración propia

Figura 58. Grafica de retraso de vehiculos en Paradero 212 Punto de Control B2



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 56, Figura 57 y Figura 58 se presentan los resultados para los retrasos de vehículos que atraviesan los corredores con presencia de paradero para cada punto de control evaluando cada escenario en aumento con el volumen vehicular.

Los resultados muestran el retraso que provoca el paradero sobre el tráfico mixto del punto de control A representados en la Figura 56, mientras se mantiene constante en cada escenario con el aumento del volumen vehicular, al llegar a un valor cercano y menor a 1 en volumen/capacidad (+20%) los retrasos son más considerables el total representado por la detención semafórica de la intersección y la interacción del tráfico al paso de la misma sobre el paradero generan mayores detenciones, especialmente en eventos de espera en cola para otras rutas del sistema sobre el paradero con aumentos hasta del 26%.

El retraso de los vehículos que atraviesan el paradero 212 en el punto de control B1 mostrados en la Figura 57 se vuelven considerables más por el aumento de rutas en servicio que por el aumento del volumen, especialmente para valores cercanos a 1 de volumen/capacidad. El efecto de la señal de paso

en la intersección y la interacción de los autobuses del sistema de transporte en la línea de parada con el tráfico mixto proyectan retrasos, disminución de velocidad o detenciones importantes entre el 20% y 50%, mientras unas pueden ser solventadas igualmente por la señal de paso en la intersección otras pueden conllevar a pequeños retrasos acumulados proyectando un estado de saturación sobre el corredor, fijando condiciones de volumen/capacidad iguales o aproximadas a 1 con volúmenes más bajos en la línea de para en la intersección.

Las modelaciones generadas para un valor inferior, superior y muy cercanos a 1 en v/c iniciales aumentan considerablemente en el momento de incorporar las primeras 3 o 6 rutas del sistema, creando detenciones forzadas del tráfico particular y proyectando demoras a los autobuses del sistema.

En la Figura 58 se aprecia notablemente el aumento de los retrasos provocados por las rutas del Módulo A00 y su progresivo crecimiento para el punto de control B2.

Se estima que los retrasos del tráfico mixto en efecto de las rutas en el paradero aumentan por completo desde un 45% hasta un 112%, especialmente por una espera doble generada por la ocupación del carril por el tráfico particular, y posteriormente por la espera en cola que registra los autobuses para presentar servicio especialmente en los módulos A00 y B00, es decir los autobuses registran mayores retrasos que el tráfico particular al momento de realizar el giro a derecha desde la Av. Calle 100 sentido occidente oriente hasta la Av. Carrera 19 al Sur.

En la Tabla 35, Tabla 36 y Tabla 37 se presenta un resumen del cálculo generado para la calificación del nivel de servicio generado para los puntos de control A, B1 y B2 respectivamente.

Tabla 35. Niveles de servicio para punto de control A

Volumen	RUTAS ACTIVAS							
	0	3	6	9	12	15	18	21
1100	D	D	D	D	D	D	D	D
1222	D	D	D	D	D	D	D	D
1344	D	D	D	D	D	D	D	D
1466	D	D	D	D	E	E	E	E
1589	D	E	F	F	F	F	F	F

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36. Niveles de servicio para punto de control B1

Volumen	RUTAS ACTIVAS							
	0	3	6	9	12	15	18	21
785	D	D	D	D	D	D	D	D
924	D	D	D	D	D	D	D	D
1063	D	D	D	D	D	D	D	D
1201	D	D	D	D	D	D	D	D
1340	D	D	D	D	D	D	D	D
1478	D	D	D	D	D	D	D	E
1562	D	D	E	E	E	E	E	E

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. Niveles de servicio para punto de control B2

Volumen	RUTAS ACTIVAS							
	0	3	6	9	12	15	18	21
785	D	D	D	D	D	D	D	D
924	D	D	D	D	D	D	D	D
1063	D	D	D	D	D	E	E	E
1201	D	D	D	D	E	E	E	E
1340	D	D	E	E	E	E	E	E
1478	D	E	E	E	F	F	F	F
1562	D	E	F	F	F	F	F	F

Fuente: Elaboración propia

3.5 Escenario Mejorado

El escenario mejorado a partir de este caso de estudio en particular y las proyecciones para todas las modalidades se debe ajustar a los análisis de tiempos de viaje, capacidad del corredor y niveles de servicio a partir de las detenciones y demoras indeseadas formadas por el efecto de los autobuses en servicio sobre los paraderos en acera revisados anteriormente. Con el propósito de establecer un rango de volúmenes de tráfico mixto ideales que originen las menores afectaciones tanto a los autobuses del sistema de transporte como al mismo tráfico mixto del corredor.

Para iniciar existen algunas recomendaciones generales sobre la ubicación del paradero respecto a una intersección, ya que como se evidencio en los análisis, un paradero posterior a una intersección semaforizada con suficiente espacio para la formación de cola de los autobuses del sistema presenta menores afectaciones a la capacidad del corredor que los paraderos anteriores a una intersección semaforizada, especialmente para los tiempos de viaje y capacidad.

Debido a que la ubicación de interés para un paradero en la ciudad depende de otros factores más importantes en la movilidad de los pasajeros, se recomienda que un paradero en acera esté dispuesto lo más alejado posible de la línea de parada de la intersección.

Por otra parte, realizar una configuración en la infraestructura del paradero generando múltiples módulos, genera mejoras importantes, como se observa en las gráficas de la Figura 47 y Figura 48, aumentar un módulo estabiliza los tiempos de viaje, que particularmente para este caso proyecta una mejora promedio de un 55%, este valor depende directamente del número de autobuses y sus respectivos tiempos de permanencia, pero siempre pronosticara una fuerte mejora especialmente si se encuentran lo suficientemente separados para que no exista interacción entre uno y el otro.

Lamentablemente esta condición solo se puede proyectar en cuerdas de la ciudad donde exista longitudes mayores de 70m como se muestra en la Figura 19, sin incluir la cola de autobuses para el

ultimo modulo. Así mismo algunas otras variables que permiten una mejor condición del escenario son prácticamente inviables como: aun aumento del tiempo efectivo de la señal de paso de la intersección, un arribo programado en el paradero distribuido uniformemente entre las rutas que presentan servicio o aumentos de carriles sobre el corredor.

Por lo tanto y enfocados a lo dispuesto en; el Plan Maestro de Movilidad; las características y objetivos en la incorporación del SITP y su integración con los actuales modos de transporte público y especialmente una movilidad sostenible. Desde la administración y planeación de movilidad en la ciudad se debe desestimular el uso del transporte privado, de manera que estos viajes se traspongan al sistema de transporte público u otros medios alternativos como la bicicleta.

Bajo el análisis en el desarrollo de este trabajo, por el efecto de los paraderos en acera en la incorporación de las rutas y autobuses del SITP, el escenario debe cumplir de manera que los volúmenes totales del tráfico sean tan altos como la capacidad del corredor en interacción con la intersección semaforizada lo permitan es decir un volumen/capacidad ≈ 1 . Y posteriormente determinar una disminución del volumen de tráfico mixto de manera que los tiempos de viaje, la capacidad y los niveles de servicio no proyecten cambios significativos.

Debido a la diferencia de condiciones en el análisis, para un paradero posterior a una intersección, un escenario preferible atendiendo a los 3 tipos de análisis desarrollados, es simplemente mantener un volumen reducido en un 12% del calculado para una relación v/c en correlación con la intersección aproximado a 1. A partir de ese valor y conforme aumenten el volumen del tráfico mixto, los tiempos de viaje empezaran aumentar drásticamente como se observa en la gráfica de la Figura 46 junto con la Tabla 28.

Para el paradero anterior a una intersección semaforizada e igualmente atendiendo a los 3 tipos de análisis desarrollados, es necesario dividir las situaciones más críticas presentes en el corredor, especialmente para el tráfico que realiza el giro a derecha en la intersección.

Los valores de v/c para el tráfico del corredor con paradero antes de una intersección semaforizada tienen que ser equilibrados sobre todo para aquellos en los que el flujo relativo para movimientos que ocupen el carril donde se presenta el servicio de los autobuses sean congruentemente altos para el tipo de paradero. El escenario debe cumplir manteniendo un volumen reducido entre un 12% a 21% del calculado para una relación v/c en correlación con la intersección aproximado a 1. El valor sobre este rango dependerá del flujo relativo en la intersección, así como el número de rutas que realizan el giro.

Si una intersección presenta un diseño de $v/c \approx 1$, lo cual sería una condición ideal, al momento de incorporar un paradero con entre 3 y 6 rutas, más del 20% del tráfico presenta algún tipo de interacción con los autobuses del sistema al momento de realizar las paradas de servicio, de hecho, los más afectados con hasta un 50% en detenciones indeseadas son los mismos autobuses del sistema provocadas por altas tasas de falla al realizar el arribo.

Finalmente atender algunas de las recomendaciones ya sea en la distribución de rutas o dividir el paradero en módulos mejora la capacidad del paradero en sí, pero de nada sirve si los volúmenes de tráfico siguen por encima de las predicciones a la hora de fomentar una movilidad sostenible.

4. CONCLUSIONES

La gestión en el desarrollo del sistema integrado de transporte público de Bogotá ha mostrado un aumento menor pero progresivo especialmente en la incorporación de autobuses dentro del Sistema Urbano, actualización de flota y aumento de la capacidad reduciendo el BUS 19 e incorporando BUS 50 y BUS 80 a pesar de la disminución de la demanda generada por la pandemia del COVID 19, el sistema continuo con el objetivo de cubrir gradualmente una cobertura completa y sostenible para toda la ciudad.

Los efectos de congestión vehicular confirmados hasta febrero de 2020 y representados de igual forma en los tres años anteriores por (TomTom, 2020) e incluso durante el año 2021 en efectos de la reactivación cívica durante la pandemia han ubicado a la ciudad de Bogotá en una posición mundial desfavorable con más días de congestión. El análisis generado en el desarrollo de este trabajo se ha enfocado en los tiempos adicionales de retrasos y demoras inducidas en el tráfico mixto a través de un corredor típico de la ciudad acompañado de una intersección semafórica en las interacciones por el aumento del volumen de vehículos particulares y la incorporación normal en su infraestructura del SITP en la ejecución de Rutas y paradas en servicios de un paradero típico.

Por medio de la toma de información de campo para: geometrización física del corredor e intersección, volúmenes, composición, flujo relativo, tiempos de permanencia y aforos vehiculares e individuales del SITP Urbano y a través de un modelo de micro simulación se ha podido representar con escenarios de análisis y variaciones del volumen de tráfico mixto el comportamiento y el efecto de las paradas del SITP en servicio sobre los paraderos en acera para la capacidad de todo el corredor.

Es importante resaltar que existen variables a través de la ciudad en los tiempos de señales de paso en las intersecciones semaforizadas y que puede generar efectos diferentes más o menos efectivos en coincidir con una parada en servicio antes de una intersección que después de una intersección y que

esta variable depende sobre el tipo de corredor en el que se encuentre la línea de paraderos a los que corresponda armónicamente con una “ola verde”.

De acuerdo a los resultados, otros aspectos que puede permitir variaciones es la ubicación del paradero en relación con la línea de pare de la intersección, ya que puede existir una distancia optima sobre todo para casos en donde los paraderos se encuentren dentro de intersecciones semaforizadas. Las distancias entre Módulos permiten variaciones sin embargo la distancia de la última en referencia con la línea de pare de la intersección sigue siendo más importante.

El análisis de capacidad por efecto de los paraderos en acera de los autobuses del SITP fue evaluado con los 3 aspectos desarrollados en el documento: tiempos de viaje, capacidad y niveles de servicio, cada uno con sus particulares definiciones en número de vehículos, tiempos de recorrido, tiempos de retraso y demoras.

Las dos modalidades en los resultados se presentaron para un paradero posterior a la intersección para servicio de al menos 21 rutas con 73 autobuses del sistema y un promedio global en los tiempos de permanencia de 23.1 segundos con un mínimo promedio de 14.0 segundos y un máximo promedio de 36 segundos. Un paradero anterior a la intersección con 3 módulos y servicio de al menos 21 rutas del sistema con 127 autobuses y un promedio global de tiempos de permanencia de 19.1 segundos con un mínimo promedio de 10.3 segundos y un máximo promedio de 34.4 segundos.

Los resultados fueron encaminados a variar el volumen porcentualmente con el de campo para reconocer sobre la intersección un factor volumen/capacidad similar a 1, que pudiera aportar escenarios desde los más bajos hasta los más críticos, normales a los niveles de congestión en Bogotá

El paradero 242A01 posterior a la intersección y evaluado con el punto de control A presento: tiempos críticos en un aumento de los tiempos de viaje en 23% del tráfico mixto, una reducción global de la capacidad con 0.55% y retrasos o demoras por disminución de velocidad o paradas en cola con un aumento del 26%.

Teniendo en cuenta lo anterior el aumento de los tiempos de viaje puede no ser demasiado crítico al presentarse eventuales situaciones de saturación en la fase semafórica pero que con el próximo ciclo se libera adecuadamente, lo que finalmente induce a una baja reducción de la capacidad global del corredor con 0.55%. Por otro lado, un aumento en los retrasos de los vehículos con un 26% puede ser especialmente perjudicial para las rutas del SITP ya que este tiempo resulta acumulativo a lo largo del ciclo de cada ruta retrasando progresivamente el arribo esperado para los próximos paraderos.

El paradero 212 anterior a la intersección evaluando el punto de control B1 presento: resultados críticos en aumentos de viaje con un 12% del tráfico mixto, una reducción global de la capacidad con 3.7% y retrasos o demoras por disminución de velocidad o paradas en cola con un aumento de hasta el 50%.

El punto de control B2 definido para los vehículos que realizan el movimiento desde la Av. Calle 100 sentido occidente oriente a la Av. Carrera 19 sentido sur evaluado con el punto de control B2 presento: resultados críticos en aumentos de tiempos de viaje con un 35%, aclarando que solo al incorporar el módulo A con 3 rutas se evidencia un aumento entre 10% hasta 12%; reducción global de la capacidad estimada desde 5.6% hasta 6.5% y retrasos o demoras por disminución de velocidad y detenciones en cola con un aumento de hasta el 112%.

El estudio proyectado de los efectos en la capacidad provocados por un paradero en acera posterior a una intersección nos muestran que aunque se manifiestan mayores tiempos de viaje progresivamente con la incorporación de rutas en el paradero la capacidad del corredor para el tráfico mixto que continua por el corredor de manera general no se ve afectado, sin embargo la presencia de intersecciones semaforizadas a lo largo del corredor en interacción con los paraderos inducen a que los autobuses del sistema se agrupen en las intersecciones, estas acumulaciones se proyectan consecutivamente al paradero posterior a la intersección donde eventos con 3 o más autobuses en

servicio aumentan los tiempos de retrasos por esperas inminentes e indeseables en el momento del arribo.

El efecto provocado de paraderos en acera anterior a la intersección semaforizada por otra parte mantiene resultados contundentes. Dividir el paradero en múltiples módulos repartiendo las rutas equitativamente por unidades es un inicio base de una mejora completa a la capacidad del paradero. De esta forma cada módulo se comportaría como un paradero independiente, sobre todo si mantiene una distancia como la que existe entre los módulos B00 y C00.

Inclusive sobre esta base del análisis, la capacidad del corredor se ve afectada especialmente para los vehículos que realizan el movimiento a derecha, el mayor inconveniente se presenta para los retrasos o demoras por disminución de velocidad y detenciones en cola de todo el sistema que puede llegar al doble de tiempo en el paso por el corredor con respecto a un tiempo de servicio y tiempo de viaje ideal.

Los escenarios mejorados y a los que se debe apuntar desde la planeación de un sistema de transporte público de pasajeros son generar una demanda controlada que progresivamente incentive y disminuya el uso de vehículos particulares y no característicamente lo contrario como ha sucedido en la ciudad de Bogotá donde la interacción con progresivos aumentos de vehículos particulares con los autobuses del SITP y sus servicios en paraderos en acera inducen al aumentos de tiempos de viaje, reducciones menores de la capacidad vial pero acumulativas en toda la red y retrasos en los arribos de las rutas del sistema, proyectando deficiencias ambientales y bajos niveles de servicio en las experiencia del usuario en el uso continuo del sistema.

Finalmente se recomienda para el sector académico en continuidad con el desarrollo de trabajos similares: El estudio del efecto de paraderos continuos en interacción con múltiples cuadras semaforizadas sobre el tráfico mixto y el estudio de la capacidad de paraderos individuales y modulados en relación con los tiempos de permanencia y arribo de los autobuses del sistema.

5. REFERENCIAS

- ALBARRACÍN, L. (2019). *EL TIEMPO Casa Editorial*. Obtenido de Demoras en el SITP:
<https://www.diarioadn.co/noticias/demoras-en-el-sitp-el-problema-es-frecuente+articulo+16886320>
- Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C. (2005). *Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte*. Bogota DC: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- AlRukaibi, F., & AlKheder, S. (2018). Optimization of Bus Stop Stations in Kuwait. *Sustainable Cities and Society*, 726-738.
- ALVARADO, N. F. (2020). *RESOLUCIÓN 269 DE 2020*. Bogotá, D.C.
- AZHAR AL-MUDHAFFAR et al. (2016). Bus stop and bus terminal capacity. *Transportation Research Procedia* 14, 1762-1771.
- Basu, D., Roy, S., Maitra, S., & Majumdar, B. (2020). An assessment towards identifying improvement needs of urban bus stop infrastructure: Knowledge gained from Bhubaneswar. *Transportation Research Procedia*, 3802-3813.
- Bautista, L. F. (2016). *Análisis del Tiempo de Permanencia en Parada de los Buses del Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá en la Calle 72 Entre Carrera 68 y Avenida Boyacá*. Bogotá, DC.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- BIAN, B. (2015). Bus service time estimation model for a curbside bus stop. *Transportation Research Part C* 57, 103-121.
- Chioni, E., Iliopoulou, C., Milioti, C., & Kepaptsoglou, K. (2020). Factors affecting bus bunching at the stop level:. *International Journal of Transportation*, 207-217.
- HCM. (2016). *Transportation Research Board HIGHWAY CAPACITY MANUAL*. WASHINGTON, DC.

Minyu, S., Weihua, G., Sangen, H., & Han, C. (2019). Capacity approximations for near- and far-side bus stops in de dicated bus lanes. *Transportation Research*, 94-120.

MiRutaFacil. (2019). *MAPAS Y RUTAS URBANAS DEL SITP*. Obtenido de <https://mirutafacil.com/rutas-sitp/urbanas-sitp/>

PTV Vissim. (2021). *Areas de aplicacion de PTV Vissim*. Obtenido de <https://www.ptvgroup.com/es/soluciones/productos/ptv-vissim-nuevo/areas-de-aplicacion/>

PTV_GROUP. (08 de 06 de 2021). *Validación de Modelos de Transporte Público*. Obtenido de <https://app.discover.ptvgroup.com/e/es?s=1398155824&e=1216894&elqTrackId=3565E70F4137BF5ECD66689194172963&elq=1a8ca7dfa01c4b6f928c41bb183056ba&elqaid=6474&elqat=1>

Restrepo, O. O. (2019). *Bogota Como Vamos*. Obtenido de <https://bogotacomovamos.org/preocupacion-crecimiento-de-parque-automotor/>

Secretaria Distrital de Movilidad. (2015). *RESOLUCIÓN 264 DE 2015*. Bogotá DC.

Shatnawi, N., Al-Omarib, A., & Al-Qudahb, H. (2020). Optimization of Bus Stops Locations Using GIS Techniques and. *Procedia Manufacturing*, 52-59.

SHEN, M. (2019). Capacity approximations for near- and far-side bus stops in dedicated bus lane. *Transportation Research Part B* 125, 94-120.

TCRP. (2013). *Transit Capacity and Quality of Service Manual Third Edition*. WASHINGTON, D.C.: Transportation Research Board.

TomTom. (2020). *Clasificación del Índice de Trafico*. Obtenido de https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/ranking/

Traffic_Index. (2019). *Traffic Index*. Obtenido de full ranking: https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/ranking

Transmilenio. (2016). *Manual del usuario del Sistema TransMilenio*. Bogota DC.

Transmilenio. (17 de 04 de 2019). *Información General del SITP*. Obtenido de

https://www.sitp.gov.co/publicaciones/40081/beneficios_del_sitp/

Transmilenio. (2020). *Estadística de oferta y demanda del Sistema Integrado de Transporte Público SITP*.

Bogotá: Informe No. 71.

Transmilenio. (01 de 08 de 2020). *Tarifas del Sistema TransMilenio*. Obtenido de

<https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/146280/tarifas/>

WEITIAO WU et al. (2017). Modelling bus bunching and holding control with vehicle overtaking and distributed passenger boarding behavior. *Transportation Research Part B 104*, 175-197.

WEITIAO WU et al. (2019). Simulation-based robust optimization of limited-stop bus service with vehicle overtaking and dynamics: A response surface methodology. *Transportation Research Part E 130*, 61-81.

XIQUN CHEN et al. (2016). Time-of-day vehicle mileage fees for congestion mitigation and revenue generation: A simulation-based optimization method and its real-world application. *Transportation Research Part C 63*, 71-95.

6. ANEXOS

Información de campo

Micro simulación