

Ing. Jesús Heberto Castro
Maldonado

Evaluación del impacto del transporte de carga en el tránsito vehicular cercano a
una parada de autobús.

2022



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Evaluación del impacto del transporte de carga en el tránsito vehicular cercano a
una parada de autobús.

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta

Ing. Jesús Heberto Castro Maldonado

Dirigido por:

Dr. Ricardo Montoya Zamora

Querétaro, Qro. a abril 2022



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL TRANSPORTE DE CARGA EN EL TRÁNSITO VEHICULAR CERCANO A UNA PARADA DE AUTOBÚS.

Opción de titulación

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Ing. Jesús Heberto Castro Maldonado

Dirigido por:

Dr. Ricardo Montoya Zamora

Dr. Ricardo Montoya Zamora
Presidente

Firma

Dr. Roberto De La Llata Gómez
Secretario

Firma

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Vocal

Firma

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Suplente

Firma

M.I. Emilio Abarca Pérez
Suplente

Firma

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Fecha (será el mes y año de aprobación del Consejo Universitario)
México

DEDICATORIAS

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Ha sido un orgullo y privilegio ser su hijo.

AGRADECIMIENTOS

Hoy como siempre agradezco primero a Dios, por todas las bendiciones que he recibido en mi vida, por guiarme a lo largo de mi vida, por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad, por permitirme culminar esta nueva etapa de la vida.

A mis padres, por ser los principales promotores de mis sueños, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me han inculcado. Gracias por ser quienes son y por creer en mí.

A mis hermanos Diana y Francisco con sus consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

A la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Autónoma de Querétaro por darme la oportunidad de cursar mis estudios y brindarme el apoyo de sus instalaciones y recursos necesarios para que este trabajo de investigación y mis estudios se pudieran llevar a cabo.

A mis compañeros de clase por apoyo a lo largo de la maestría, ayudarme en asesorías, prácticas, sus consejos y por hacer un gran trabajo en equipo, así también en las gestiones administrativas.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología el apoyo económico sin el cual no habría podido culminar esta maestría.

Por último y no menos importante, quiero agradecer a mis profesores que compartieron desinteresadamente su conocimiento saciando mis ansias de aprender; he aquí el resultado de mis esfuerzos y sus enseñanzas, en especial al Dr. Ricardo Montoya Zamora por su apoyo a lo largo de la maestría y en particular en esta investigación, quien me ha guiado con su paciencia, y su rectitud como docente.

ÍNDICE

1. Introducción	11
1.1. Descripción del problema	13
1.2. Justificación	15
2. Antecedentes	16
2.1. Paradas de autobús.....	16
2.1.1. Paradas de autobús en vía pública.....	16
2.1.1.1. Impacto de las paradas de autobús en el tránsito vehicular	17
2.1.1.2. Impacto en la capacidad vial	23
2.1.1.3. Mitigación del impacto negativo de las paradas de autobús	29
2.1.2. Impacto en la capacidad vial	23
2.1.3. Mitigación del impacto negativo de las paradas de autobús	29
2.2. Semáforos	31
2.2.1. Semáforos tiempo fijo o predeterminado	32
2.2.2. Semáforos accionados	33
2.3. Vehículos de carga.....	35
2.4. Simuladores computacionales de tráfico	36
2.4.1. Modelado de tráfico microscópico	37
2.4.2. Calibración y validación.....	38
3. Hipótesis	42
4. Objetivo	42
3.1. Objetivos específicos	42
5. Metodología	42
5.1. Esquema de la metodología	43
5.2. Elección de secciones a analizar	43
5.3.1. Geometría de la vialidad.....	46
5.3.2. Volumen y velocidad del tráfico	46
5.3.3. Tiempo de permanencia y frecuencia del autobús.....	47
5.4. Simulación de las condiciones de tráfico.....	47
5.4.1. Alimentación del software con datos reales	48
5.4.2. Calibración y validación de los datos actuales según los datos reales	51
5.5. Realización de experimentación en simulador	53
5.5.1. Creación de escenarios	53

5.5.2. Obtención de datos del simulador y cálculos correspondientes	53
6. Resultados y discusión	54
6.1. Obtención de datos de campo	54
6.2. Calibración y validación	67
6.2.1. Datos de calibración	67
6.3. Análisis de resultados	68
7. Conclusiones	79
8. Referencias bibliográficas.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Proceso de validación de un modelo.....	38
Figura 5.1: Esquema del proceso de la metodología.....	42
Figura 5.2: Sección ubicada en 5 de febrero y carretera a Tlacote sentido Norte-Sur.....	43
Figura 5.3: Sección ubicada en 5 de febrero y carretera a Tlacote sentido Sur-Norte.....	43
Figura 5.4: Sección ubicada en Universidad y Tecnológico.....	44
Figura 5.5: Sección ubicada Universidad y Corregidora.....	44
Figura 5.6: Ubicación de las secciones a estudiar.....	45
Figura 5.7: 5 de febrero y tlacote dirección Sur-Norte.....	47
Figura 5.8: 5 de febrero y tlacote dirección Norte-Sur.....	48
Figura 5.9: Ave. Universidad y Tecnológico.....	48
Figura 5.10: Ave. Universidad y Corregidora.....	49
Figura 5.11: Estado de tráfico ejemplo.....	50
Figura 5.12: Ubicación de detectores.....	51
Figura 6.1: Movimientos direccionales de 5 de febrero y tlacote dirección Sur-Norte.....	55
Figura 6.2: Movimientos direccionales de 5 de febrero y tlacote dirección Norte-Sur.....	59
Figura 6.3: Movimientos direccionales de avenida Universidad y Tecnológico.....	62
Figura 6.4: Movimientos direccionales de avenida Universidad y Corregidora.....	66
Figura 6.5: Características de conducción de los vehículos particulares.....	66
Figura 6.6: Diferencia de datos reales con respecto al experimento dinámico.....	67
Figura 6.7: Variación de las filas vehiculares durante la mañana.....	70
Figura 6.8: Variación de las filas vehiculares durante la tarde.....	71
Figura 6.9: Variación de la capacidad vial durante la mañana.....	71
Figura 6.10: Variación de la capacidad vial durante la tarde.....	72
Figura 6.11: Gráfico de los residuos para la variable de flujo vehicular.....	74
Figura 6.12: Gráfico de los residuos para la variable de intervalo de paso de autobuses.....	74

Figura 6.13: Gráfico de los residuos para la variable de porcentaje de vehículos pesados.....	75
Figura 6.14: Gráfico de los residuos para la variable de tiempo de parada.....	75
Figura 6.15: Gráfico de probabilidad normal regresión 1.....	76
Figura 6.16: Gráfico de los residuos para la variable de porcentaje de vehículos pesados regresió.	78
Figura 6.17: Gráfico de probabilidad normal regresión 2.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Softwares de simulación de tráfico.....	40
Tabla 6.1: Resultados observados durante la mañana en 5 de febrero de Sur-Norte.....	53
Tabla 6.2: Resultados observados durante la tarde en 5 de febrero de Sur-Norte.....	54
Tabla 6.3: Resultados observados durante la mañana en 5 de febrero de Norte-Sur.....	56
Tabla 6.4: Resultados observados durante la tarde en 5 de febrero de Norte-Sur.....	57
Tabla 6.5: Resultados observados durante la mañana en avenida Universidad y Tecnológico.....	59
Tabla 6.6: Resultados observados durante la tarde en avenida Universidad y Tecnológico.....	61
Tabla 6.7: Resultados observados durante la mañana en avenida Universidad y Corregidora.....	63
Tabla 6.8: Resultados observados durante la tarde en avenida Universidad y Corregidora.....	64
Tabla 6.9: Filas vehiculares registradas actualmente.....	68
Tabla 6.10: Filas vehiculares variando la porción de vehículos pesados durante la mañana.....	69
Tabla 6.11: Filas vehiculares variando la porción de vehículos pesados durante la tarde.....	69
Tabla 6.12: Capacidad vehicular variando la porción de vehículos pesados durante la mañana.....	69
Tabla 6.13: Capacidad vehicular variando la porción de vehículos pesados durante la mañana.....	70
Tabla 6.14: Análisis de varianza de datos de las filas vehiculares.....	77

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1: Probabilidad que una parada esté ocupada.....	17
Ecuación 2.2: Número promedio de autobuses en cola.....	17
Ecuación 2.3: Unidad de vehículos de pasajeros.....	25
Ecuación 2.4: velocidad media del flujo.....	25
Ecuación 2.5: Tiempo de impacto en la parada de autobús lineal.....	26
Ecuación 2.6: Reducción de capacidad de la parada de autobús lineal.....	26
Ecuación 1.7: Capacidad ideal de las secciones.....	27
Ecuación 2.8: Capacidad con la influencia de una parada de autobús.....	27
Ecuación 2.9: Capacidad en intersección semaforizada cuando hay una obstrucción.....	28
Ecuación 2.10: Capacidad del carril de la acera.....	28
Ecuación 2.11: Ecuación de GEH.....	39
Ecuación 6.1: Cálculo de filas vehiculares.....	73
Ecuación 6.2: Cálculo de capacidad vial variando el porcentaje de vehículos pesados.....	77

RESUMEN

Las paradas de autobús son importantes en el sistema de transporte; sin embargo, su operación puede ocasionar retrasos en el resto de los vehículos, debido al bloqueo de un carril de la vialidad. Además, de la presencia de vehículos "lentos", como camiones unitarios o articulados que limitan la capacidad de la vialidad. El propósito de esta investigación fue medir el impacto que provoca la presencia de vehículos pesados en el tránsito vehicular cercano a una parada de autobús semaforizada. La metodología consistió en recolectar información de cuatro intersecciones semaforizadas con características similares. Las cuatro intersecciones tuvieron una parada de autobús cercana al semáforo, pero sólo dos de ellas contaron con la circulación de camiones de carga. La información se introdujo en un software de simulación de tráfico para replicar las condiciones del tránsito en las cuatro intersecciones y analizar la variación de presencia de vehículos pesados y su influencia en las paradas de autobús. Esta investigación se limitó al análisis del comportamiento en la hora punta y a la ubicación de las paradas de autobús cerca y antes del semáforo. Los hallazgos mostraron que, a mayor presencia de vehículos pesados, mayores las filas vehiculares en todas las secciones, pero se tuvo un mayor impacto en aquellas vialidades con menos flujo y un mayor intervalo de paso de los autobuses. El incremento de la cola vehicular no aumentó de manera proporcional conforme aumentó el porcentaje de vehículos pesados y esta relación no fue lineal. La originalidad de esta investigación fue la contribución de la simulación de las filas vehiculares en la parada incluyendo vehículos pesados.

(Palabras clave: Paradas de autobús, vehículos de carga, simuladores de tráfico)

ABSTRACT

Bus stops are essential in the transportation system; however, their operation can cause delays in the rest of the vehicles due to the blockage of one lane of the road. In addition, the presence of "slow" vehicles, such as unitary or articulated trucks limits the road's capacity. The purpose of this research was to measure the impact caused by the presence of heavy vehicles in vehicular traffic near a traffic light bus stop. The methodology consisted of collecting information from four light traffic intersections with similar characteristics. All four intersections had a bus stop near the traffic light, but only two had cargo trucks' circulation. The information was fed into traffic simulation software to replicate traffic conditions at the four intersections and analyze the variation in the presence of heavy vehicles and their influence on bus stops. This research was limited to analyzing peak hour behavior and the location of bus stops near and before the traffic light. The findings showed that the greater the presence of heavy vehicles, the greater the vehicular queues in all sections, but there was a more significant impact on those roads with less flow and a greater interval of the passage of buses. The increase in the vehicle queue did not increase proportionally as the percentage of heavy vehicles increased, and this relationship was not linear. This research's originality was a simulation of the contribution of the vehicular queues at the stop, including heavy vehicles.

systems. (**Keywords:** Bus stops, freight vehicles, traffic simulators)

1. Introducción

La capacidad de las vialidades urbanas se ve afectada por actividades que se llevan a cabo en la acera, como, la operación de una parada de autobús (Patkar y Dhamaniya, 2020). En ese sentido, Luo et al. (2018) indican que, por lo general, hay dos tipos de paradas de autobús en una ciudad: sobre el carril y bahías de autobús. En el primer caso, los autobuses ocupan los carriles adyacentes a la acera cuando suben y bajan pasajeros, por lo tanto, los vehículos que vienen detrás deben cambiar de carril o esperar a que termine el servicio de parada, en consecuencia, el funcionamiento normal del tráfico en el carril de la derecha se ve seriamente afectado.

Otros autores como Simoni y Claudel (2017) hablan sobre las obstrucciones en las corrientes de tráfico, asociadas con la presencia de autobuses, pero, además, con camiones de carga o vehículos pesados en las vialidades, estas situaciones se caracterizan por un bloqueo parcial de la vía, lo que Li et al. (2011) denominan como, “cuello de botella en movimiento”. Zhao et al. (2014) evaluaron las interacciones entre autobuses y bicicletas en diferentes paradas. Sin embargo, solo analizan los impactos en la velocidad de la bicicleta y no consideran los vehículos pesados. Zhang et al. (2018) evalúan y comparan cómo los diferentes diseños de paradas de autobús influyen en el retraso de vehículos, bicicletas y autobuses, dejando de lado los vehículos pesados y concluyen que donde se encuentra un carril compartido para vehículos, autobuses y el carril para bicicletas separado tuvo el menor impacto en la velocidad y el retraso de la bicicleta, pero tuvo el mayor impacto en la velocidad y el retraso del vehículo. Raj et al. (2020) estudiaron como afecta una parada de autobús sobre un carril en la mitad de una vialidad mediante el uso de un microsimulador de tráfico variando la composición vehicular y observando los cambios en la capacidad de la vialidad por ello desarrollan múltiples modelos de regresión lineal para predecir los valores de PCU para vehículos y la capacidad de la sección ideal y de parada de autobús.

Liang et al. (2019) mencionan que, las paradas de autobús se encuentran comúnmente a poca distancia de las intersecciones semaforizadas, lo que facilita la transferencia de pasajeros entre líneas de autobús, a su vez, Glick y Figliozzi (2017), señalan que, las

demoras en las intersecciones semaforizadas tienen un mayor impacto por las paradas ubicadas cerca del semáforo en comparación con las paradas intermedias o las ubicadas lejos de la intersección.

Para Nguyen-Phuoc et al. (2017), se han utilizado principalmente tres enfoques para investigar los impactos de la congestión asociados con el transporte público. El primer enfoque es observar y comparar las condiciones del tráfico antes y durante un paro del transporte público. El segundo enfoque examina los efectos de la congestión del transporte público y adopta modelos analíticos del sistema de transporte. El tercer enfoque consiste en utilizar el modelo de la red de transporte para contrastar el nivel de congestión en dos escenarios: "con transporte público" y "sin transporte público". En relación con eso, Fitzpatrick y Nowlin (1997) comentan que los programas de simulación de tráfico se pueden utilizar para analizar los efectos de varios factores en las operaciones de un sistema de manera mucho más apropiada. Dea et al. (2019) desarrollan diferentes regresiones lineales con la pérdida de la velocidad alterando algunas variables como la frecuencia del autobús, el ancho efectivo y el flujo.

Se han desarrollado diferentes investigaciones para conocer el comportamiento vial cerca de las paradas de autobús en China, realizadas por, Qian et al. (2010) evaluaron la pérdida de velocidad con diferentes tiempos de espera mediante autómatas celulares, Li et al. (2012) utilizaron el método de análisis de la distribución de la hora de llegada del autobús, desde la estación de salida hasta la parada de autobús, comparando las paradas en bahía y sobre un carril. Yang et al. (2012) desarrollaron un método basado en la teoría de las colas, donde propusieron modelos de capacidad y velocidad de los automóviles para las paradas sobre un carril, bahía y el desvío para bicicletas. Wang y Zhirui (2015) usaron una simulación para explorar los efectos de una arteria con cinco intersecciones y tres paradas en bahía para observar la relación entre el volumen de tráfico y las demoras para ubicaciones de paradas de autobús (cercana, lejana y a mitad de la cuadra).

Sin embargo, hay pocos estudios que consideran el efecto de los vehículos pesados que afectan de manera importante la capacidad vial y es por ello que esta investigación determinó el impacto en la capacidad vial de dos intersecciones semaforizadas cercanas a la parada de autobús (sobre el carril) con y sin la presencia de vehículos pesados. El impacto

se midió a través del efecto en las filas vehiculares en un semáforo mediante el uso de un microsimulador, variando el intervalo de paso de los autobuses y el porcentaje de vehículos en la hora pico matutina y vespertina.

1.1. Descripción del problema

Las ciudades de los países emergentes están creciendo rápidamente. Debido a este rápido crecimiento, uno de los sectores más afectados es el del transporte, donde el creciente flujo vehicular ha superado la capacidad de la infraestructura vial existente (Hossain y Hasan, 2000). Wang *et al.* (2015) mencionan que los servicios de transporte público son una opción de traslado para muchas personas en las ciudades más importantes del mundo, por lo tanto, es de suma importancia aumentar la calidad del servicio, la mejora constante en la operación y el diseño.

Yang *et al.* (2009) comentan que las paradas de autobús son el primer punto de contacto entre el pasajero y el servicio de transporte, añadiendo que, el espacio, la ubicación, el diseño y la operación de las paradas de autobús influyen significativamente en el rendimiento del sistema de transporte, debido a esto, es importante analizar lo que mencionan El-Geneidy *et al.* (2006) sobre la ubicación y el espaciado, comentando que las paradas de autobús son uno de los elementos más importantes del proceso de planificación del servicio de transporte. Desafortunadamente cuando se planea y opera una parada de autobús puede afectar al tránsito vehicular, esto debido principalmente por un mal diseño de dicha instalación o por limitaciones de la vialidad.

A su vez, Koshy y Arasan (2005) nos indican que el tráfico mixto existente en las vialidades urbanas en los países emergentes se caracteriza por una mayor presencia de autobuses en comparación con los países desarrollados. Debido a eso, las paradas de autobús son el rasgo más característico en las redes viales urbanas de dichos países. En ese sentido Tirachini *et al.* (2014) y Bansal *et al.* (2014) mencionan que los autobuses pueden reducir la velocidad de los automóviles en vialidades mixtas. Por lo tanto, existen posibles efectos de congestión y amontonamiento.

Por su parte Yang *et al.* (2012) afirman que, a pesar que se han presentado varias alternativas al elegir el tipo de instalación para una parada de autobús, como pueden ser,

paradas en la vía pública, en forma de bahía y los diseños de desvío de bicicletas, ninguna de estas alternativas es completamente ventajosa en todas las condiciones.

Chand y Chandra (2017) mencionan que las paradas en la vía pública, aunque no son la mejor opción para el tránsito vehicular, éstas se construyen en vialidades urbanas muy transitadas donde no hay espacio suficiente para una bahía de autobuses segregada. En ese mismo sentido Chavis y Christofa (2016) señalan que, si no existen bahías segregadas, las paradas de autobús bloquean los carriles, provocando retrasos excesivos y potencialmente un embotellamiento, además, Li *et al.* (2012) apuntan que, a pesar que el segmento de la vialidad en la que se encuentran paradas de autobús sobre un carril es muy corta, este tipo de paradas forman un cuello de botella en la sección de la vialidad, y que, además, es un factor importante que afecta la capacidad de la vialidad cerca de la parada del autobús.

Referente al tráfico mixto en las vialidades urbanas, Simoni y Claudel (2017) hablan sobre las obstrucciones en las corrientes de tráfico, que suelen estar asociadas, como ya mencionamos, con la presencia de autobuses en el tráfico urbano, pero, además con camiones de carga o vehículos más lentos en las vialidades. Todas estas situaciones se caracterizan por un bloqueo parcial de la vía que provoca una reducción de la capacidad.

Por su parte, Betanzo-Quezada (2011) menciona que la ciudad de Querétaro está localizada en un punto importante de movimiento de carga debido a que se encuentra en una posición estratégica, que uno el centro con el norte y occidente de México, aunado al gran crecimiento que ha tenido la ciudad en los últimos años, lo que ha provocado grandes problemas de congestión vehicular (Obregón-Biosca y Betanzo-Quezada, 2015).

Sin embargo, aunque se ha prestado atención al efecto negativo que ocasionan las paradas de autobús en vía pública, como el ocasionado por los vehículos de carga, los estudios que combinan estos dos tipos de transporte son muy limitados. Debido a lo anterior, es importante prestar atención a la congestión vial generada por la operación de las paradas de autobús que obstruyen un carril, considerando la presencia de vehículos de carga, por lo cual, esta investigación plantea generar recursos para entender mejor el fenómeno y que sirva como herramienta para profesionales que se dedican a la planeación urbana.

1.2. Justificación

Patkar y Dhamaniya (2020) señalan que el efecto que provocan el flujo de tránsito en las paradas de autobús en vialidades con diferentes anchos y el análisis del efecto de los vehículos no motorizados, peatones y estacionamientos en la vialidad, debe ser estudiado. En ese sentido nos podemos remitir al estudio realizado por Yang *et. al.* (2012), a pesar que su trabajo ha brindado información valiosa sobre los efectos del diseño de la parada de autobús en el flujo de tráfico mixto usando un modelo de teoría de colas, recomienda desarrollar otros modelos de colas para describir el comportamiento del sistema de autobuses en función del tráfico real, además, considerar el efecto en una intersección semaforizada. En ese sentido, la investigación llevada a cabo por Chavis y Christofa (2016) propone un método de mitigación del impacto que ocasiona una parada de autobús en la vía pública cercana a una intersección semaforizada, los autores sugieren ampliar la metodología para tomar en cuenta los casos en los que el autobús está detenido por más de un ciclo.

Rao *et al.* (2017) mencionan que, el rendimiento del tráfico se ve afectado por muchos factores, como la superficie de la vialidad, el arcén y la calzada, las habilidades del conductor, el ancho, la fricción lateral o las actividades laterales, el terreno, el mantenimiento de las carreteras, entre otras. Tomando como referencia esto, Raj *et al.* (2020) desarrollaron un modelo de simulación de tráfico microscópico para una sección urbana dividida a mitad de cuadra con tráfico desordenado variando las diferentes proporciones de los distintos tipos de vehículos más utilizados en la sección vial, además los autores señalan que es importante incluir otras variables presentes en una vialidad que disminuyan la capacidad de la sección, como el caso de vehículos de carga.

Se han desarrollado diferentes investigaciones para conocer el comportamiento vial cerca de las paradas de autobús, realizadas por Fitzpatrick y Nowlin (1997), Qian *et al.* (2010), Li *et al.* (2012), Yang *et. al.* (2012), Wang y Zhirui (2015), Patkar y Dhamaniya (2020) hacen un análisis de las variables que permiten valorar la pérdida de capacidad en la vialidad, cada uno de diferente perspectiva. Sin embargo, hay pocos estudios que consideran el efecto de otros elementos que afectan el tránsito como los vehículos de carga. Con base en

lo anterior, el propósito de la investigación es brindar una perspectiva que permita entender la problemática ocasionada por una parada de autobús, considerando situaciones habituales de una intersección urbana, y así, tener herramientas para una mejor planeación de dicha infraestructura del transporte.

2. Antecedentes

A continuación, se presentan investigaciones que abordan el impacto de la operación de la parada de autobús en el tránsito vehicular. Primeramente, definiendo conceptos importantes, continuando con los distintos estudios que abordan el impacto de la operación de las paradas de autobús en el tránsito vehicular, así como la manera en que se analizan y finalizando con la influencia de vehículos pesados

2.1. Paradas de autobús

Los puntos de parada y estaciones son componentes importantes de un sistema de transporte público, puesto que ejercen una influencia considerable en la operación ya que, limitan la capacidad de línea y por ende el número de unidades de transporte que pueden operar y su ubicación y espaciado debe ser adecuado para atraer al usuario. Un aspecto muy importante que debe tenerse presente es el referente al tiempo requerido para el ascenso y descenso de usuarios se divide en tres secciones; tiempo requerido para efectuar la parada, tiempo de ascenso y descenso y tiempo requerido para realizar la salida (Molinero y Sánchez 2002). Por su parte, Ben-Edigbe y Mashros (2011), definen una parada de autobús como un lugar designado donde los autobuses se detienen para que los pasajeros suban o bajen.

2.1.1. Paradas de autobús en vía pública

Entre los tipos de paradas existentes tenemos la parada en la vía pública, Chand y Chandra (2017) las definen como aquellas ubicadas en la vialidad al lado de la acera, y Molinero y Sánchez (2002) señalan que constituye la infraestructura más sencilla de un sistema de transporte. Naturalmente, la operación de este tipo de paradas implica el bloque momentáneo del carril por donde circulan los vehículos, disminuyendo considerablemente la capacidad de la vía. En ese sentido, Este tipo de paradas, según Chand y Chandra (2014), crean un cuello de botella temporal para el flujo de tráfico y cuando los autobuses se detienen en este tipo de paradas, obligan a los vehículos que siguen al autobús a cambiar de

carril. Debido a esto, las velocidades de los vehículos que siguen al autobús y también de los que circulan por los carriles adyacentes disminuyen.

Con la finalidad de entender mejor el fenómeno, Xiaobao *et al.* (2013) analizan la probabilidad de que una parada en la vía pública está ocupada siguiendo un modelo de colas M/M/K según la ecuación 2.1.

$$P_s = 1 - \left(\sum_{j=0}^{k-1} \frac{P_b^j}{j!} + \frac{P_b^k}{k!} * \frac{k}{k - P_b} \right)$$

Ecuación 2.1: Probabilidad que una parada esté ocupada

Además, analizan el número promedio de autobuses en cola con la ecuación 2.2

$$L = E(N) = \frac{P_b^k}{k!} * \frac{k P_b}{(k - P_b)^2} * (1 - P_s) + P_b$$

Ecuación 2.2: Número promedio de autobuses en cola

Donde:

P_s = Probabilidad que una parada éste ocupada

$L(N)$ = Número promedio de autobuses en cola

P_b = es el producto de la tasa de llegada de autobuses y la media del tiempo de permanecía del autobús en la parada

K = El número de espacios para autobuses en la parada

J = Número de espacios ocupados.

2.1.1. Impacto de las paradas de autobús en el tránsito vehicular

Según Liang *et al.* (2019) y Jin *et al.* (2019), los estudios sobre cómo los autobuses impactan a los automóviles se pueden clasificar en tres tipos: estudios observacionales, estudios basados en simulaciones o algoritmos de búsqueda metaheurística y estudios basados en modelos analíticos, y en ese sentido, para Nguyen-Phuoc *et al.* (2017), se han utilizado tres enfoques principales para investigar los impactos de la congestión asociados con el transporte público. El primer enfoque es observar y comparar las condiciones del tráfico antes y durante una huelga del transporte público. El segundo enfoque que examina

los efectos de la congestión del transporte público, adopta modelos analíticos del sistema de transporte. El tercer enfoque consiste en utilizar el modelo de la red de transporte para contrastar el nivel de congestión en dos escenarios: "con transporte público" y "sin transporte público". en relación con eso, Fitzpatrick y Nowlin (1997) comentan que los programas de simulación de tráfico se pueden utilizar para analizar los efectos de varios factores en las operaciones de un sistema de manera mucho más apropiada.

Zhao *et al.* (2014) desarrollaron enfoques cuantitativos para analizar las interacciones entre autobuses y bicicletas en las paradas de autobús. Los datos observados probaron la importancia de las diferencias en las velocidades de las bicicletas y se propuso un modelo para predecir el número de eventos de encuentro entre autobuses y bicicletas. Los resultados indican que la velocidad de las bicicletas se ve influenciada significativamente cuando un ciclista se encuentra con un autobús en una parada de autobús donde ambos tipos de vehículos comparten el mismo carril. Sin embargo, esta influencia varía en los diferentes tipos de paradas de autobús. Por lo que los autores recomiendan establecer franjas para separar sus trayectorias de movimiento puede reducir o eliminar el efecto sobre la eficiencia y la seguridad.

En ese sentido, Keeling *et al.* (2019) presentan un enfoque novedoso para estudiar los conflictos entre autobuses, bicicletas y automóviles, los conflictos se clasifican en función de los escenarios de tráfico y se identifican y cuantifican las principales fuentes de retraso. Los resultados muestran que la superposición de las instalaciones de autobuses y las instalaciones para bicicletas da lugar a numerosos conflictos entre estos dos tipos de vehículos, con mayor frecuencia durante las horas punta. Sin embargo, ocurren conflictos complejos entre el autobús y la bicicleta, aunque con menos frecuencia, durante las horas de menor actividad. Los resultados del análisis sugieren que la caja de bicicletas en el sitio no contribuye significativamente al retraso del autobús.

Referente al impacto que se tiene en los vehículos no motorizados, Yan *et al.* (2020) investigaron el funcionamiento del flujo de tráfico de vialidades con presencia de paradas en vía pública y bahías de autobuses mediante grabación de video. Analizaron la influencia de los tipos de paradas en la velocidad de la bicicleta y la capacidad. Finalmente, con base a los resultados del estudio, los autores presentaron algunas sugerencias para determinar el

tipo de parada y seleccionar los parámetros de una parada. Los principales resultados y conclusiones son los siguientes:

- Sin pasajeros cruzando, las bahías de autobuses tienen un impacto significativo en la velocidad de las bicicletas, mientras que esto no pasa en paradas en vía pública;
- La parada en vía pública y la bahía de autobuses reducen la capacidad de las vías en un 32% y un 13,5% en promedio, respectivamente;
- A diferencia de las bahías de autobuses, las paradas en la acera tienen un impacto más significativo en la capacidad de la vía, que también se presenta en la influencia de los parámetros de configuración de las paradas; y
- Se recomiendan bahías de autobús para seleccionar el tipo de parada. Con respecto a las especificaciones de las paradas, se sugiere una plataforma más larga y pocos accesos, mientras que los accesos más anchos y más estrechos se adaptan bien a las paradas en vía pública y a las bahías de autobuses, respectivamente.

A su vez, Yu *et al.* (2018) cuantifican la influencia de los tipos y parámetros de las paradas de autobús en la capacidad del carril no motorizado adyacente. Posteriormente, con base en los resultados, se dan las siguientes sugerencias.

- Con el mismo ancho de carriles no motorizados, las bahías de las paradas de autobús tienen un impacto menor en la capacidad de los carriles no motorizados adyacentes que las paradas en vía pública.
- Los pasajeros que entren o salgan de las paradas de autobús tendrían impactos a corto plazo del flujo de tráfico no motorizado.
- Se propone el diseño de paradas de autobús, basado en controles de pasajeros.

Glick y Figliozzi (2017), determinaron que, las filas de tráfico o las demoras en las intersecciones semaforizadas pueden tener un impacto importante en los horarios de los autobuses en las paradas ubicadas aguas arriba o aguas abajo en comparación con las paradas intermedias o las paradas ubicadas lejos de las señales de tráfico. Cuando un autobús se detiene antes de la intersección de una parada aguas abajo (retraso con indicación roja), los retrasos pueden aumentar en promedio. Para paradas aguas arriba, la demora en la intersección puede reducirse si el autobús usa una indicación verde después de

atender a los pasajeros durante una luz roja. Por lo tanto, las paradas aguas abajo fueron puntos con grandes movimientos de pasajeros ubicados después de las principales calles transversales con tiempos en rojo más largos que las de las calles secundarias. Se observó que el tiempo medio por pasajero por embarque o bajada, disminuye a medida que aumenta el número total de pasajeros que abordan o bajan. El tiempo de permanencia es un componente importante del tiempo de viaje en autobús y la variabilidad del tiempo de viaje. A su vez, la distribución de los tiempos de viaje en autobús afecta los costos de los operadores de tránsito y la satisfacción del cliente. Este estudio tiene importantes implicaciones para los esfuerzos por reducir los tiempos de viaje en autobús, y a su vez, reducir los retrasos del resto de los vehículos.

Es importante entonces, ver los resultados a los cuales llegaron Johar *et al.* (2019) ya que en caso de tener paradas de autobús aguas abajo conduce a un rango mayor de densidad crítica (la densidad corresponde al flujo máximo) para el automóvil, mientras que la capacidad de la red es casi la misma. Esto da como resultado un régimen operativo óptimo más grande. Es decir, arrojan que la parada de autobús aguas abajo es superior a la parada de autobús aguas arriba desde la perspectiva de la operación de la red.

En ese sentido, Johar *et al.* (2020) discuten los efectos de la ubicación de la parada de autobús y el número de paradas en el tráfico de automóviles y el sistema de transporte público a nivel de red, es decir, a un nivel macroscópico. Por lo que se ha encontrado que, las paradas de bus aguas abajo dan como resultado un mejor rendimiento de la red en términos de rango de capacidad (es decir, el conjunto de la densidad del automóvil y la densidad de autobuses en el que la red se desempeña cerca de su capacidad), las paradas de autobús aguas arriba conducen a la mediana más baja en el diagrama de caja del retraso promedio de la red para el sistema de transporte público. Sin embargo, las paradas de autobús aguas abajo dan como resultado una mediana más baja para el tráfico de automóviles y el aumento en el número de paradas aumenta la capacidad de la red y disminuye la mediana en el diagrama de caja de retardo promedio de la red, tanto para el tráfico de automóviles como para el sistema de transporte público.

Zhang *et al.* (2018) evaluaron cómo los diferentes diseños de paradas de autobús influyen en las operaciones del tráfico vecino. Consideraron cuatro paradas de autobús que difieren

en disposición geométrica. Con los datos recolectados en el campo, evaluaron el retraso de vehículos, bicicletas y autobuses para cada parada. Para efectuar en análisis, los autores utilizaron cuatro tipos de paradas. La parada de autobús tipo 1 contiene el carril compartido para bicicletas / autobuses. Es decir, el carril para bicicletas está diseñado en el lado derecho de los carriles para vehículos, el autobús que llega ocupa el espacio del carril bici, las bicicletas pasan por la parada desde el lado derecho o desde el lado izquierdo del autobús. El tipo de parada 2, es similar al 1 con la diferencia que el carril destinado para la bicicleta y el autobús esta segregado con respecto al tránsito vehicular, excepto donde está ubicada la parada. La parada de autobús tipo 3 contiene el carril compartido para vehículos/autobuses con el carril para bicicletas interno separado. El carril para bicicletas está separado de los carriles para vehículos y la parada de autobús tiene un diseño en la acera. El autobús que llega ocupa el espacio del carril exterior para vehículos. Los vehículos pueden cambiar a los carriles interiores para pasar el autobús o esperar después del autobús en el carril exterior, en este caso, las bicicletas no interfieren en el tránsito y el autobús solamente afecta al tránsito vehicular. Finalmente, la parada de autobús tipo 4 contiene un diseño de bahía con el carril para bicicletas interior separado, el autobús que llega entra en la bahía para dejar y recoger pasajeros, el autobús no ocupa el espacio del carril para vehículos o carril para bicicletas. Los resultados del estudio mostraron que los diferentes diseños de paradas de autobús tenían impactos bastante diferentes en el flujo de tráfico. La parada de tipo 3 tuvo el menor impacto en la velocidad y el retraso de la bicicleta, pero tuvo el mayor impacto en la velocidad y el retraso del vehículo. La parada de tipo 4 no perturba el tráfico de bicicletas y vehículos, pero ocupa la mayor parte del espacio vial y también limita la cantidad de autobuses que pueden detenerse. Las ventajas y desventajas de cada diseño de parada se resumieron en el estudio. Propusieron un procedimiento cuantitativo para ayudar a los urbanistas a decidir qué parada de autobús considerar para minimizar el retraso total de todos los modos. Se puede seguir el mismo procedimiento para decidir cómo rediseñar las paradas de autobús actuales para mejorar las operaciones de tráfico.

Liang y Ma (2018), analizaron los retrasos ocasionados por los autobuses agrupados en una parada de autobús en el tránsito vehicular, es decir, cuando más de un autobús se encuentra en tiempo de parada, concluyeron que los autobuses agrupados provocan mayores retrasos

en los coches en comparación con los autobuses independientes y que cuando los pasajeros de los autobuses agrupados están muy desequilibrados, los retrasos de los coches en el escenario de autoorganización de pasajeros son mayores que los del escenario de control de omisión de paradas, este último control plantea que el autobús no haga la parada si no hay ningún pasajero que la pida.

Algo no muy estudiado hasta el momento en las paradas en forma de bahía lo abordan Yong-Sheng *et al.* (2010) ya que, analizan el impacto del tiempo de estacionamiento de autobuses en el flujo de tráfico en este tipo de paradas. El trabajo se calibró con la longitud celular y la velocidad de vialidad de una nueva forma y se propone un modelo de autómatas celulares para flujo de tráfico mixto en un sistema de dos carriles bajo condición de límite periódico, que considera la parada de tránsito en forma de bahía. El estudio muestra que, la influencia del tiempo de estacionamiento de autobuses en el flujo del tráfico, como se esperaba, cuanto mayor es el tiempo de estacionamiento promedio, menor es el flujo de tráfico. En segundo lugar, podemos encontrar que cuanto menor es la densidad de autobuses, mayor es la velocidad promedio del autobús; y cuanto mayor es el tiempo de estacionamiento del autobús, menor es la velocidad promedio del autobús. Además, con el aumento del tiempo de estacionamiento, aumenta el número de autobuses que esperan fuera de la bahía, lo que hace que la velocidad media de los autobuses disminuya. Como consecuencia, está claro que esto tiene un valor de referencia importante y un valor práctico en el trabajo real de la ubicación de las paradas de autobús, la disposición inteligente de las rutas de los autobuses, los cálculos precisos de los retrasos de los autobuses en el estado de funcionamiento y la capacidad. de paradas de autobús.

Dea *et al.* (2019), analizaron que, cuando los autobuses se detienen en la vialidad en una parada en vía pública, parte del ancho del camino se pierde dependiendo de la posición en la que se detiene el autobús, lo que reduce el ancho efectivo de la vialidad disponible para el resto del tráfico. La reducción de la vía de circulación repercute en la velocidad del tráfico de otros vehículos creando una situación de cuello de botella. En ese sentido, Reddy (2017), señalan que la evaluación de la velocidad de los vehículos en un tráfico mixto es un fenómeno complejo que se ocupa predominantemente de muchos parámetros influyentes que actúan directa o indirectamente sobre el flujo del tráfico. La ausencia de disciplina en

los carriles, la falta de ancho de la vía debido a la presencia de paradas de autobús en vía pública, la falta de tecnología avanzada, la falta de del espacio vial debido al crecimiento vehicular y la falta de técnicas de manejo son algunas de las razones del flujo de tráfico congestionado en las áreas urbanas. En consecuencia, la capacidad de la vialidad se reduce a medida que aumenta la influencia de los factores causales. Por lo tanto, el autor intenta cuantificar la reducción de capacidad de la cuadra media debido a la presencia de parada de autobús en vía pública.

2.1.2. Impacto en la capacidad vial

Para Shen *et al.* (2019), a pesar de ocupar una pequeña fracción del flujo de tráfico, los autobuses tienen un gran impacto en la capacidad de las vialidades, especialmente cuando hay mucho tráfico, para esto, el TRB (2016) define capacidad como la tasa máxima por hora a la que se puede esperar razonablemente que las personas o los vehículos atraviesen un punto o un segmento uniforme de un carril o vía, el tráfico y el control. La capacidad de una sección de la carretera puede verse influenciada por varios factores, como el tipo de superficie, el ancho de la calzada y el arcén, el terreno, habilidades del conductor, la fricción lateral o actividades laterales, el mantenimiento de la carretera, entre otros factores.

La investigación llevada a cabo por Mushule *et al.* (2012) presenta los resultados de un estudio que se llevó a cabo para evaluar el desempeño de la bahía de buses y su influencia en la capacidad de la red vial. Los resultados indican que solo el 18% de las paradas de la bahía de buses estudiadas no tenían la capacidad adecuada para atender la demanda disponible. El 9% no tenía la capacidad adecuada durante las horas pico, pero la capacidad era adecuada durante las horas de menor actividad. El 73% restante de las paradas de la bahía de autobuses posee una capacidad adecuada todo el tiempo. Aunque la mayoría de las paradas de la bahía de autobuses estudiadas poseen la capacidad adecuada, se observó una congestión severa en estos lugares. Esto se debe al comportamiento errático de los conductores de autobuses que no utilizan el espacio provisto para dejar y recoger pasajeros. Claramente, esta es un área que requiere una aplicación más estricta para aliviar el problema de congestión en la ciudad al operar la capacidad existente de manera más eficiente.

Para XiaoBao *et al.* (2011) la estimación de la capacidad es uno de los temas de investigación importantes en la ingeniería de tráfico. Comentan también que, la capacidad en una intersección no semaforizada se mide con dos enfoques, el procedimiento de aceptación de brechas y el método de regresión empírica. El primer método se ha utilizado principalmente en los Estados Unidos y en muchos países europeos. Pero la teoría de la aceptación de la brecha pierde por completo su aplicabilidad cuando se aplica a peatones o ciclistas. Los comportamientos del tráfico en los países en desarrollo son muy difíciles de calcular y analizar con las reglas comunes utilizadas en los países desarrollados. El método de regresión empírica se desarrolla mediante una gran cantidad de datos de campo de medición para obtener resultados representativos. Los autores determinan que, la capacidad del automóvil cerca de la parada es función de las tasas de flujo de las corrientes en conflicto y el tiempo de permanencia de los autobuses. En segundo lugar, discuten casos especiales de efectos peatonales y prioridad limitada del flujo de bicicletas. Concluyendo que el modelo de capacidad del automóvil que considera una prioridad limitada es consistente con el estado real del tráfico. Los resultados pueden ser aplicables al diseño y análisis operativo de paradas de autobús en otros países en desarrollo. Además, se observa que para mejorar el modelo del sistema de tráfico mixto y validarlo experimentalmente, se están realizando investigaciones empíricas y calibraciones relacionadas.

El efecto de las paradas de autobús con la influencia de una intersección semaforizada, es también estudiada por Zhao *et al.* (2007). Consideran cuatro casos, de acuerdo con dos condiciones, que la parada está aguas arriba o aguas abajo de la intersección, y que exista o no un carril especial de parada. Los resultados de las simulaciones indican que la parada de autobús aguas arriba intersección sirve como cuello de botella. Los autores hacen las siguientes sugerencias.

- Un carril de parada especial es necesario para disminuir el efecto negativo y garantizar una mayor capacidad del flujo de tráfico si una parada de autobús está muy cerca de las intersecciones. Si bien su beneficio puede ser insignificante cuando un autobús se detiene mucho más lejos de las intersecciones.
- Es favorable sustituir la parada de autobús de aguas arriba por la de aguas abajo.

Acorde a Fan *et al.* (2018), los automóviles de pasajeros no sólo entran fácilmente en conflicto con los autobuses cerca de las paradas de autobús en vía pública, sino también con vehículos no motorizados, debido a que el autobús interfiere en la ruta de esta clase de vehículos, por lo que es importante considerar su efecto en los retrasos provocados por el efecto del autobús. Por su parte, Gu *et al.* (2014) señalan que, en una intersección semaforizada, el efecto de la ubicación de la parada de autobús, ya sea aguas arriba o aguas abajo, tiene un efecto en el aumento de los retrasos del sistema. Todas estas situaciones afectan la capacidad de una sección de la vialidad, en ese sentido, Kumar y Khatawkar (2015), puntualizan que, el número y el tipo de paradas de autobús que se encuentran en una vialidad influyen significativamente en las características de flujo del tráfico en la ésta. Por tanto, se puede postular que cualquier cambio en la ubicación predominante de una parada de autobús podría desencadenar un cambio en la capacidad de la vialidad.

Rao *et al.* (2017) mencionan que, el rendimiento del tráfico se ve afectado por muchos factores, como la superficie de la vialidad, el arcén y la calzada, las habilidades del conductor, el ancho, la fricción lateral o las actividades laterales, el terreno, el mantenimiento de las carreteras, entre otras. La fricción lateral incluye paradas de autobús de todo tipo. Por ese motivo, los autores estudiaron, los efectos que provocan la fricción lateral junto a la parada de autobús, la bahía de autobuses y el estacionamiento en la calle y en la velocidad y capacidad de viaje de las arterias urbanas de Delhi. Así también, Liu *et al.* (2015) estiman la capacidad de los enlaces viales para las diferentes etapas de la operación de las paradas de autobús. Calcularon el factor de impacto temporal para revelar la ocupación de la parada de autobús en la capacidad del enlace vial. Además, proponen un modelo clásico de colas para analizar el tiempo de espera de los autobuses para entrar en la parada y la probabilidad de desbordamiento de una parada de autobús multilínea.

De acuerdo con Chand *et al.* (2014), hay tres parámetros básicos del flujo de tráfico; la velocidad, el volumen y la densidad. Éstos se utilizan para estimar la capacidad de transporte de tráfico de una vialidad. Para el cálculo del número de diferentes tipos de vehículos que pasan un punto para una condición de tráfico heterogénea utilizaron la ecuación 2.3.

$$PCU = \frac{V_c \times A_i}{V_i \times A_c}$$

Ecuación 2.3: Unidad de vehículos de pasajeros

Donde:

V_c = Velocidad del vehículo de referencia

V_i = Velocidad de vehículo i

A_c = Área del vehículo de referencia

A_i = Área del vehículo i

Para el cálculo de la velocidad media, Chand et al. (2014) utilizaron la ecuación 2.4

$$V_m = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \times v_i}{\sum_{i=1}^N n_i}$$

Ecuación 2.4: velocidad media del flujo

Donde:

V_m = Velocidad media del flujo

n_i = número de vehículos de la categoría i, en un período de recuento

v_i = Velocidad de los vehículos de la categoría i (km/h)

N = Número total de categorías de vehículos en el flujo de tráfico.

Li y Cao (2016) Recopilaron datos relevantes de las características de distribución de llegada de vehículos en las paradas de autobús, las características de distribución del tiempo de estacionamiento del vehículo y las características del tiempo de desaceleración del vehículo. Realizaron una regresión de datos estadísticos, calibraron los parámetros relevantes y obtuvieron un modelo de regresión. Utilizaron modelos logarítmico, cuadrático y lineal para ajustar la frecuencia de llegada con los datos estadísticos del tiempo de impacto, el modelo cuadrático tiene un mejor efecto de ajuste, por lo tanto, el modelo empírico de la tasa de llegada y el tiempo de impacto en la parada de autobús lineal se presenta en la ecuación 2.5.

$$T = 574.103 - 33.934\lambda - 3588.054\lambda^2$$

Ecuación 2.5: Tiempo de impacto en la parada de autobús lineal

Donde:

T= Tiempo de impacto en la parada (S)

λ = Tasa de llegada de los autobuses

Además, con el cálculo anterior, determinaron un modelo de reducción de capacidad de la parada de autobús lineal en la zona de separación, como se muestra en la ecuación 2.6.

$$C_1 = C_p \left(1 - \frac{T_1}{3600} \right) = C_p (0.841 - .0094\lambda + 0.0003\lambda^2)$$

Ecuación 2.6: Reducción de capacidad de la parada de autobús lineal

Donde:

C_p = La capacidad de tráfico del carril exterior (pcu / h)

λ = Tasa de llegada de bus (veh / h), $\lambda \leq 60$ veh / h

T_1 = El tiempo de impacto de la influencia de la parada de autobús en el carril adyacente en 1 hora.

Raj *et al.* (2020) desarrollaron un modelo de simulación de tráfico microscópico para la sección urbana dividida a mitad de cuadra en tráfico desordenado. El modelo desarrollado se calibró y validó utilizando los datos recopilados de la ciudad de Bangalore. Luego, el modelo de simulación validado se utiliza para simular el comportamiento del tráfico en la sección de la parada de autobús con el fin de investigar el impacto de la parada de autobús en vía pública en los valores de Unidad de vehículos de pasajeros (PCU) de varios tipos de vehículos (variando el volumen y la composición del tráfico) y la capacidad (variando la composición del tráfico). Con la simulación, se desarrollan múltiples modelos de regresión lineal para predecir los valores de PCU para vehículos y la capacidad de las secciones ideal y de parada de autobús. Encuentran que los modelos de regresión que mejor se ajustan para predecir la capacidad ideal de las secciones, y con parada de autobús se muestran en las ecuaciones 2.7 y 2.8 respectivamente:

$$CI = 5523.653 - 22.948(P_{Car}) - 76.232(P_{Bus}) - 23.123(P_{HV})$$

Ecuación 2.7: Capacidad ideal de las secciones

$$CB = 4459.36 - 219.34(P_{Car}) - 43.91(P_{sBus}) - 23.13(P_{nsBus}) - 21.03(P_{HV})$$

Ecuación 2.8: Capacidad con la influencia de una parada de autobús

P_{Car} = Porcentaje de vehículos

P_{Bus} = Porcentaje de autobuses
 P_{sBus} = Porcentaje de autobuses que se detienen
 P_{nsBus} = Porcentaje de autobuses que no se detienen
 P_{HV} = Porcentaje de vehículos pesados

Gayah *et al.* (2015) aplicaron la teoría variacional de ondas cinemáticas en un sistema de coordenadas de tiempo en movimiento para examinar el impacto de las obstrucciones, como puede ser una parada de autobús, en las capacidades de las intersecciones semaforizadas. La teoría es general, requiere muy pocos cálculos y se puede aplicar a obstrucciones de cualquier tipo, duración y ubicación, tanto aguas arriba como aguas abajo de la intersección. Por lo tanto, proporciona una imagen más completa de cómo la capacidad de intersección podría verse afectada por obstrucciones. La capacidad de la intersección semaforizada, cuando hay una obstrucción, se puede determinar utilizando la ecuación 2.9.

$$q_c = \frac{\Delta Z_s - \max\{\Delta N_s', \Delta N_o'\}}{nC}$$

Ecuación 2.9: Capacidad en intersección semaforizada cuando hay una obstrucción

Donde:

q_c = Capacidad de señal considerando impactos de obstrucción (veh / tiempo)

ΔZ_s = Costo de la ruta de la señal (veh)

$\Delta N_s'$ = Reducción de costos en la ruta de la señal modificada sobre la ruta de la señal (veh)

$\Delta N_o'$ = Reducción de costos en la ruta de la señal modificada sobre la ruta de la señal (veh)

n = Número de ciclos considerados en el período de análisis

C = Duración del ciclo (tiempo)

La investigación llevada a cabo por Luo *et al.* (2018) utiliza la teoría de brechas y la teoría de colas para construir modelos de tiempo de efecto y capacidad potencial en diferentes condiciones, incluidas las paradas de autobús en la acera. El modelo para estimar la

capacidad del carril de la acera cuando el tiempo de permanencia es mayor que el intervalo promedio es dado por la ecuación 2.10.

$$C_b = (C_o - 2\lambda) \left(1 - \frac{T_a}{3600}\right) + 2\lambda$$

Ecuación 2.10: Capacidad del carril de la acera

Donde:

C_b = Capacidad del carril de la acera cuando el tiempo de permanencia es mayor que el avance promedio en las paradas de autobús junto a la acera.

C_o = Capacidad base del carril de la acera sin impacto del autobús

λ = La cantidad de autobuses que llegan a la parada de autobús en una hora.

T_a = Tiempo efectivo de las paradas de autobús en la acera sin interferencias en una hora

2.1.3. Mitigación del impacto negativo de las paradas de autobús

Dentro de las propuestas de mitigación del efecto negativo de las paradas de autobús, Gu *et al.* (2013) analizan el caso en que, un autobús se encuentre en tiempo de parada sobre carril, limitará la cola de los automóviles río arriba durante el tiempo verde en una intersección semaforizada. Utilizaron la teoría de las ondas cinemáticas para explorar formas de mitigar este daño. El método consiste en aplazar algunas llegadas de los autobuses al paradero, un autobús que se detiene (o frena) en su carril antes de la parada sería casi inofensivo bajo las exigencias del automóvil; y la estrategia de espera se impondría de forma selectiva, para que los autobuses no se retrasaran en sus horarios de largo plazo. Los autores indican que, los impactos favorables de estas ideas pueden ser considerables, particularmente cuando la demanda de automóviles es relativamente alta o cuando la variación en el tiempo de permanencia del autobús puede mantenerse pequeña. Continuando con las intersecciones semaforizadas, Gu *et al.* (2012) estudian cuando la cola de un automóvil se desborda más allá de una parada de autobús aguas arriba de la intersección cuando el semáforo este rojo, en esta situación, un autobús que se encuentre allí en su carril ocasionará retrasos en la fila de automóviles durante el tiempo verde. Para este problema, los autores utilizaron la teoría de ondas cinemáticas para explorar formas de mitigar este daño. Sus modelos se pueden utilizar para determinar la ubicación de una parada para alcanzar un objetivo específico. Por ejemplo, se puede optar por eliminar por

completo las demoras de los automóviles colocando la parada en la parte superior de la cola de automóviles completamente ampliada. O bien, se pueden limitar estos retrasos ubicando la parada de modo que no surja una cola de vehículos residual creada por un autobús residencial (condiciones óptimas), o que surja, pero se disipe en dos ciclos (condiciones óptimas secundarias).

Otro interesante método de mitigación es el presentado por Chiabaut *et al.* (2012), en este caso en el caso de los carriles exclusivos del transporte público, permitiendo el paso de manera intermitente a los vehículos por ese carril mientras no hubiera presencia de un autobús, y así, aumentar la capacidad de la vialidad durante esos momentos.

Para Yaseen (2019) la parada de autobús tiene una influencia significativa en la capacidad y la velocidad en las vialidades porque tienen que interferir con el vehículo que pasa y los autobuses tienen que entrar o salir de las paradas provocando turbulencias y congestión. El autor enfatiza que la condición de cuello de botella ocurre en las vialidades debido a la salida o entrada del autobús, lo que provoca una pequeña reducción del ancho real del carril. Este pequeño ancho de la vía conduce a una disminución de los parámetros de tráfico. Además, recomienda algunas medidas, por ejemplo, se deben proporcionar medidas como bahías de autobús con un diseño adecuado, no se deben permitir otras estructuras que no sean el cobertizo de pasajeros en las paradas de autobús, las paradas de autobús deben proporcionarse a ambos lados de la vialidad para cada dirección de viaje, señalización en el pavimento en la vía con la palabra "BUS" escrita en el pavimento, el estacionamiento para otros vehículos debe restringirse a ambos lados de las paradas de autobús, etc.

Además, Mahdaviyan *et al.* (2020) investigaron que, los impactos de la combinación de las condiciones de abordaje del autobús y los pasajeros que usaron dispositivos de movilidad con ruedas (Personas en Situación de Discapacidad) en el tiempo de permanencia en el autobús y el avance. Los resultados indican que el tiempo de permanencia del autobús se reduce en un 30% para las condiciones de abordaje más favorables. Los resultados también demostraron que las desviaciones de los recorridos de los autobuses de los recorridos programados con respecto a las condiciones más favorables fueron mucho menores que el diseño tradicional de los autobuses en condiciones de tráfico ligero. Hay una reducción del 47% al avance en condiciones de tráfico ligero con

pendientes favorables en las rampas, configuración interior del autobús y condiciones de seguridad. Por lo que se puede ver, acondicionar las paradas de autobús para usuarios en situación de vulnerabilidad, no sólo la hace más incluyente, sino también, reduce la congestión vial generada.

2.2. Semáforos

Reyes y Cárdenas (1994) señalan que los semáforos son dispositivos electromagnéticos y electrónicos proyectados específicamente para facilitar el control del tránsito vehículos y peatones, mediante indicaciones visuales de luces de colores universalmente aceptados, como lo son el verde, amarillo y rojo, además, su finalidad principal es la de permitir el paso, alternadamente, a las corrientes de tránsito que se cruzan, permitiendo el uso ordenado y seguro del espacio disponible. Por su parte la SCT (2014) apunta que son dispositivos electrónicos que sirven para ordenar y regular el tránsito de vehículos y peatones en calles y carreteras por medio de luces generalmente de color rojo, ámbar y verde, operados por una unidad de control, agregando que se usan para desempeñar, entre otras, las siguientes funciones:

- 1) Alternar periódicamente el tránsito de un flujo vehicular o peatonal para permitir el paso de otro flujo vehicular, a partir del reparto programado del tiempo entre los flujos concurrentes.
- 2) Regular la velocidad de los vehículos para mantener la circulación continua a una velocidad constante en una vialidad con intersecciones semaforizadas continuas (sincronismo).
- 3) Controlar la circulación por carriles.
- 4) Eliminar o reducir el número y gravedad de algunos tipos de accidentes, principalmente los que implican colisiones perpendiculares.
- 5) Proporcionar un ordenamiento y seguridad del tránsito.

El TRB (2016) indica que en general hay dos maneras de controlar el semáforo que están en uso actualmente. Se clasifican en términos generales como los predeterminados o fijos y los accionados o de tiempo variable, de acuerdo con el tipo de control que proporcionan

Por otro lado, la SCT (2014) clasifica a los semáforos de la siguiente manera:

Semáforos para el control del tránsito de vehículos

a) Semáforos no accionados por el tránsito

- Sin mecanismo de sincronización para intersecciones aisladas.
- Con mecanismos de sincronización para intersecciones aisladas.
- Que permite coordinación para intersecciones sucesivas.

b) Semáforos accionados por el tránsito

- Totalmente accionados.
- Parcialmente accionados.

c) Semáforos para pasos peatonales

- En zonas de alto volumen peatonal.
- En zonas escolares.

d) Semáforos especiales

- Semáforos de destello.
- Semáforos para maniobras de vehículos de emergencia.
- Semáforos para indicar la aproximación de trenes.

2.2.1. Semáforos tiempo fijo o predeterminado

Según El TRB (2016), el control predeterminado consiste en una secuencia fija de fases que se muestran en orden repetitivo. La duración de cada fase es fija. Sin embargo, la duración del intervalo verde se puede cambiar por hora del día o día de la semana para adaptarse a las variaciones de tráfico. La combinación de una secuencia de fase fija y una duración fija produce una duración de ciclo constante.

El funcionamiento de un controlador predeterminado o fijo puede describirse como coordinado o no coordinado. Por el contrario, el funcionamiento de un controlador accionado puede describirse como completamente accionado, semiactuado o coordinado.

2.2.2. Semáforos accionados

El TRB (2016) define que, el control accionado consiste en una secuencia de fase definida en la que la presentación de cada fase depende de si está en recuperación o el movimiento de tráfico asociado ha enviado una llamada de servicio a través de un detector. La duración del intervalo verde está determinada por la información de demanda de tráfico obtenida del detector, sujeto a los límites mínimo y máximo preestablecidos. La terminación de una fase activada requiere una llamada de servicio de un movimiento de tráfico en conflicto. Se puede omitir una fase activada si no se detecta demanda.

El control completamente accionado implica que todas las fases son accionadas y todos los movimientos de tráfico de intersección son detectados. La secuencia y la duración de cada fase están determinadas por la demanda de tráfico. Por lo tanto, este tipo de control no está asociado con una duración de ciclo constante.

El control semiactuado utiliza fases accionadas para servir los movimientos menores en una intersección. Sólo estos movimientos menores tienen detección. Las fases asociadas con los movimientos principales se operan como no activadas. El controlador está programado para habitar con las fases no activadas que se muestran en verde durante al menos una duración mínima especificada. La secuencia y la duración de cada fase activada están determinadas por la demanda de tráfico. Por lo tanto, este tipo de control no está asociado con una duración de ciclo constante.

El control coordinado es una variación de la operación semiactuada. Utiliza la configuración de desconexión forzada del controlador para restringir las fases no coordinadas asociadas con los movimientos menores para que las fases coordinadas se sirvan en el momento apropiado durante el ciclo del semáforo, y se mantenga la progresión de los movimientos principales. Este tipo de control está asociado con una duración de ciclo constante.

Reyes y Cárdenas (1994), indican que su característica principal de la operación es que la duración de los ciclos responde, en general, a la variación en la demanda de tránsito vehicular. Dicha demanda es registrada por aparatos detectores conectados al control del semáforo. Los autores señalan que, si los detectores son usados solamente en alguno de los accesos, el tipo de control es llamado semiaccionado y si es usado en todos los accesos, se le llama totalmente accionado, además, se distingue un tercer tipo de control cuando las indicaciones en los controles locales de cierta zona varían de acuerdo con información recibida sobre fluctuaciones del tránsito, suministrada a un control maestro por detectores colocados en puntos claves.

Para considerar los semáforos accionados deben analizarse los siguientes factores:

1. Volumen de vehículos

Donde el volumen de tránsito no es suficiente para justificar semáforos de tiempo fijo, se pueden emplear semáforos accionados por el tránsito.

2. Movimiento transversal

Cuando el movimiento de tránsito en la calle principal es intenso y entorpece la circulación de la calle transversal. Sin embargo, si el tránsito de la calle secundaria es lo suficientemente intenso para demandar el derecho de paso a intervalos muy frecuentes, es necesario limitar los lapsos correspondientes a la indicación de verde para la calle secundaria.

3. Horas de máxima demanda

Si se requiere controlar una intersección durante un tiempo breve en el día, como en las horas de máxima demanda.

4. Peatones

Cuando se tengan volúmenes mínimos de peatones, especificados para semáforos de tiempo fijo, pueden ser preferibles los semáforos accionados, ya que detienen la circulación de vehículos únicamente cuando los peatones pidan el paso.

5. Accidentes

Cuando sólo se satisface el requisito mínimo relativo a los antecedentes sobre accidentes para semáforos de tiempo fijo, se puede considerar la instalación de un semáforo accionado, ya que puede disminuir demoras.

6. Amplias fluctuaciones de tránsito

Según los requisitos del semáforo de tiempo fijo, es necesario instalar semáforos cuando los volúmenes de tránsito varían considerablemente.

7. Intersecciones complejas

En estos casos, además de las ventajas usuales, se puede eliminar una fase cuando no hay demanda.

1. Sistemas progresivos

Cuando los espaciamientos y otras características de las intersecciones dentro de un sistema progresivo de semáforos de tiempo fijo sean tales que no se pueda lograr una buena coordinación.

2. Cruces peatonales fuera de la intersección

En los cruces concentrados de peatones cerca de escuelas o de espectáculos se puede justificar el uso de semáforos accionados por los peatones, complementándolos con señales apropiadas.

2.3. Vehículos de carga

Una de las definiciones más aceptadas sobre vehículos de carga en el ámbito urbano la menciona Ballantyne *et al.* (2013), ya que son todos los viajes hacia, desde y dentro de un área urbana designada por vehículos de carretera específicamente dedicados a la recogida o entrega de mercancías (ya sea que el vehículo esté vacío o no), con la excepción de los viajes de compras.

Para Li *et al.* (2011), uno de los principales problemas que presentan estos vehículos es que disminuyen el nivel de servicio de una vialidad, incluso, la capacidad de la vialidad no alcanza el nivel para el cual fue diseñada originalmente. Este fenómeno ha sido llamado como cuello de botella en movimiento. Para comprender de mejor manera la problemática,

los autores analizaron un cuello de botella en movimiento con la teoría de la onda cinemática y simularon utilizando el software VISSIM. Concluyeron que, especialmente, cuando el tráfico está cerca de 2000 veh/ h, la velocidad de los automóviles disminuyó un 30% y la velocidad de los vehículos pesados disminuyó un 12%. Así también, Kerner y Klenov (2010), encontraron que hay una velocidad crítica de un cuello de botella en movimiento a la que la interrupción del tráfico, ocurre espontáneamente en el cuello de botella en movimiento, si el flujo aguas arriba del cuello de botella es lo suficientemente grande. Cuanto mayor sea el caudal, mayor será la velocidad crítica del cuello de botella en movimiento.

En ese sentido, Fadhloun *et al.* (2016) presentan una metodología para el análisis de los cuellos de botella en movimiento desde un punto de vista macroscópico al proponer una expresión explícita para el diagrama de cuellos de botella. Los hallazgos esa investigación se basan en la suposición de que el flujo de tráfico se puede modelar utilizando un diagrama fundamental triangular. El modelo proporciona información sobre el comportamiento general de los vehículos al pasar una obstrucción en movimiento. Se constata que los vehículos podrían estar acelerando o desacelerando durante la maniobra de adelantamiento según el escenario considerado. Se revela un nivel crítico de demanda equivalente aproximadamente al 40% de la capacidad para caracterizar el cambio en el comportamiento de los vehículos durante la maniobra de adelantamiento.

A su vez Fadhloun *et al.* (2017) desarrollaron un marco macroscópico integral para el análisis cuando un vehículo viaja a una velocidad considerablemente menor que la velocidad promedio del flujo de tráfico. Con ese estudio estudio, podemos tener una estimación aproximada de lo que sucedería detrás de vehículos de carga y cómo los automóviles se descargan de la cola en función del nivel de demanda.

2.4. Simuladores computacionales de tráfico

Barceló (2010) afirma que los sistemas de transporte han llevado a la simulación de tráfico a convertirse en uno de los enfoques más utilizados para el análisis de tráfico en apoyo del diseño y evaluación de los sistemas de tráfico. La capacidad de la simulación de tráfico para emular la variabilidad temporal de los fenómenos de tráfico la convierte en una herramienta única para capturar la complejidad de los sistemas de tráfico. También señala

que la simulación de tráfico es una técnica de análisis y construcción de modelos útil para ayudar a los profesionales en una amplia variedad de estudios de tráfico y transporte, con una variedad aún más amplia de objetivos, que van desde la asistencia en el diseño de nuevos sistemas hasta la evaluación de los impactos de diseños alternativos en diferentes condiciones. La simulación de tráfico también se está convirtiendo en un instrumento clave en el diseño y evaluación de sistemas de transporte inteligentes. La simulación de tráfico también es una herramienta valiosa para que los investigadores comprendan mejor los fenómenos del tráfico y creen laboratorios virtuales donde puedan realizar experimentos para probar hipótesis. El autor comenta que los fundamentos de la teoría del flujo de tráfico y su aplicación a la simulación de tráfico son:

o modelado microscópico del tráfico

o modelado de tráfico mesoscópico

o modelado de tráfico macroscópico

Según Barceló (2010), los flujos de tráfico se pueden modelar macroscópicamente desde un punto de vista basado en una analogía hidrodinámica al considerar los flujos de tráfico como un proceso de fluido particular cuyo estado se caracteriza por variables macroscópicas agregadas: densidad, volumen y velocidad. Pero también se pueden modelar microscópicamente, es decir, desde un punto de vista completamente desagregado destinado a describir el proceso de fluidos a partir de la dinámica de las partículas individuales y los modelos mesoscópicos representan una tercera alternativa de modelado intermedio basada en una simplificación de la dinámica vehicular.

2.4.1. Modelado de tráfico microscópico

El autor continúa diciendo que el modelado microscópico de los flujos de tráfico se basa en la descripción del movimiento de cada vehículo individual que compone el flujo de tráfico. Esto implica modelar las acciones, por ejemplo, aceleración, desaceleraciones y cambios de carril, de cada conductor en respuesta al tráfico circundante. Añade también que la simulación es una técnica que puede verse como un experimento de muestreo en un sistema

real dinámico a través de un modelo de computadora que lo representa formalmente. La simulación supone que la evolución del modelo del sistema a lo largo del tiempo imita adecuadamente la evolución del sistema modelado a lo largo del tiempo. Así, se recogen muestras de las variables de observación de interés. De estas muestras, se pueden sacar conclusiones sobre el comportamiento del sistema utilizando técnicas de análisis estadístico.

2.4.2. Calibración y validación

Es necesario calibrar y validar el modelo para que éste sea aceptable. El proceso de determinar si el modelo de simulación está lo suficientemente cerca del sistema real generalmente se logra mediante la validación del modelo y la información obtenida, con el fin de mejorar el modelo hasta que la precisión se considere aceptable. La validación del modelo es un proceso iterativo que calibra los parámetros del modelo, compara el modelo con el comportamiento real del sistema y utiliza las discrepancias entre los dos y la información obtenida, para mejorar el modelo hasta que la precisión se considere aceptable. Por lo tanto, la validación tiene que ver con determinar si el modelo de simulación es una representación precisa del sistema en estudio. El proceso de calibración tiene el objetivo de encontrar los valores de estos parámetros que producirán un modelo válido. Los parámetros del modelo deben suministrarse con valores. La calibración es el proceso de obtener dichos valores de los datos de campo en una configuración particular. En la Figura 2.1 se observa el proceso de validación del modelo.

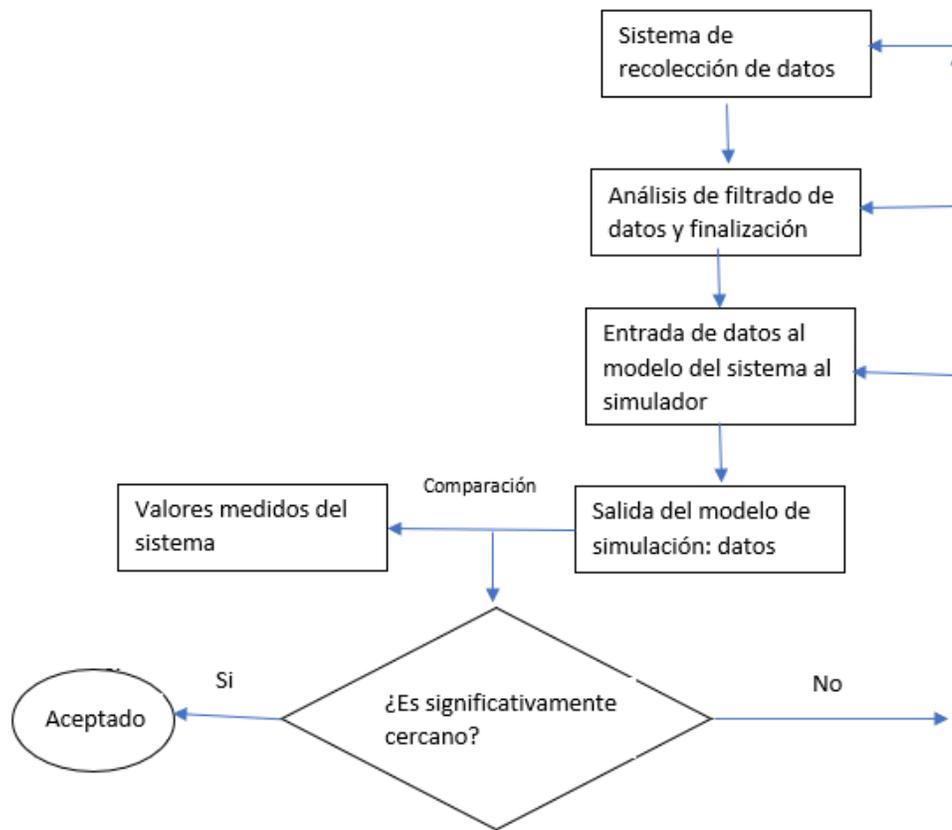


Figura 2.1: Proceso de validación de un modelo (Barceló, 2010)

Esta metodología asume implícitamente que, somos capaces de modelar correctamente los datos de entrada y el conjunto de datos medidos, comparados con los resultados de la simulación son confiables o, en otras palabras, estamos asumiendo que están libres de errores.

Las entradas de datos a los modelos de tráfico se pueden clasificar en dos categorías:

Datos directamente observables, es decir, medidas de variables de tráfico afectadas por errores (caudales, velocidades, ocupaciones, tiempos de viaje, etc.), que se basan en tecnologías disponibles y que deben ser adecuadamente filtradas y procesadas antes de utilizarlas en las aplicaciones y datos no directamente observables, como la demanda de transporte modelado en términos de tiempo dividido en matrices de origen-destino. Este proceso de entrada requiere procedimientos de estimación indirectos sólidos para generar las entradas adecuadas.

En esencia, el proceso de validación consiste en recopilar los datos simulados y compararlos con los datos medidos del sistema, con base en métodos de análisis estadístico, para determinar si las muestras de datos observados y simulados son lo suficientemente cercanas, como se indicó anteriormente. En el caso de una respuesta positiva, el modelo de simulación se acepta como válido; de lo contrario, se rechaza y se debe revisar el proceso de validación. Esto implica un procedimiento iterativo en el que, dependiendo de la situación, es necesario recopilar más o quizás nuevos datos; el procesamiento de datos debe revisarse; o el modelo de los datos de entrada debe cambiarse o perfeccionarse.

A pesar de reconocer la importancia de las mediciones individuales, muchos analistas consideran más útil utilizar mediciones conjuntas que brinden una visión general. Una que es ampliamente aceptada por los profesionales es la estadística GEH de Geoffrey E. Havers, que calcula el índice para cada estación de conteo según la ecuación 2.11:

$$GEH = \sqrt{\frac{2(x_i - y_i)^2}{x_i + y_i}}$$

Ecuación 2.11: Ecuación de GEH

Donde:

x_i = Volumen de tráfico por hora del modelo de tráfico (o conteo nuevo).

y_i = Volumen de tráfico en el mundo real (o conteo inicial)

Se recomienda tomar un valor que este entre cinco y diez, un valor superior normalmente es inaceptable. Softwares de simulación de tráfico

En la tabla 2.1 se observa resume la descripción, ventajas y desventajas de los principales softwares de simulación de tráfico que se emplean actualmente.

Tabla 2.2: Softwares de simulación de tráfico

Simulador	Referencias	Descripción	Ventajas	Desventajas
VISSIM	Fellendorf y Vortisch (2010). Gomes <i>et al.</i> (2004).	Es un sistema de simulación de tráfico discreto y microscópico que modela el tráfico de autopistas y las operaciones de tráfico urbano. Basado en varios modelos matemáticos. Ofrece una amplia variedad de aplicaciones urbanas y de carreteras, integrando transporte público y privado.	Ofrece una amplia variedad de aplicaciones urbanas y de carreteras, integrando transporte público y privado. Las condiciones de tráfico complejas se visualizan con un alto nivel de detalle respaldado por modelos de tráfico realistas. Las señales de tráfico se pueden simular.	El simulador en sí no incluye ningún dato específico de la aplicación o herramientas adicionales que se requieren para tareas adicionales de modelado y análisis de datos. A veces se requieren herramientas de software adicionales para el análisis de datos, como paquetes estadísticos, software de control de tráfico externo patentado o postprocesamiento.
PARAMICS	Sykes (2010). Fehon y Klim (2010)	S-Paramics se utiliza en una amplia variedad de modelados de transporte. Hay evaluaciones de mejora de una intersección aislada y análisis de impacto de tráfico a pequeña escala. Simula los componentes individuales del flujo de tráfico y la congestión.	S-Paramics exige crear un modelo de la red de carreteras, con el único objetivo que el conductor llegue al destino de la manera más eficiente posible, obedeciendo las reglas de la carretera e interactuando de manera segura con otros vehículos en la simulación.	En vialidades congestionadas, se observa que los conductores colaboran entre sí para permitir que los vehículos crucen corrientes de tráfico estacionarias o de movimiento lento o que se fusionen con ellos. Estas maniobras, pero en la práctica no ocurren
CORSIM	Owen <i>et al.</i> (2000). Schultz y Rilet (2005)	Utiliza la ingeniería de software introducción de sistema integrado de software de tráfico (TSIS por sus siglas en inglés) que proporciona una interfaz y un entorno integrados y fáciles de usar para ejecutar el modelo de simulación de tráfico.	Puede manejar virtualmente todas las condiciones geométricas complicadas que prácticamente salen en el campo. Ha sido calibrado para simular con precisión una amplia gama de condiciones de tráfico, desde una demanda moderada hasta condiciones muy congestionadas.	Los parámetros de calibración CORSIM rigen los movimientos del vehículo para autopistas (FRESIM) y arteriales (NETSIM) por separado
DRACULA	Liu (2010). Liu <i>et al.</i> (1995)	Se creó como un marco de modelado totalmente nuevo en el que los efectos de variabilidad y las diferencias entre los conductores y entre los días se reconocerán explícitamente desde el principio y el comportamiento de los conductores y los vehículos será tan cercano a la vida real como lo es computacionalmente posible	se amplió para una representación más realista de operaciones de transporte, demanda de pasajeros y elección de ruta, y la microsimulación de los movimientos de vehículos individuales (automóviles y autobuses) y pasajeros en una red de carreteras	Cuando se encuentra un espacio aceptable para reincorporarse el carril, el vehículo se une al tráfico de la autopista. Sin embargo, si el vehículo no ha encontrado un espacio aceptable antes de llegar al final del carril de aceleración, se registrará una falla de fusión.
AIMSUN	Casas <i>et al.</i> (2010). Ciuffo <i>et al.</i> (2013)	Las principales áreas de aplicación de Aimsun son la ingeniería de tráfico fuera de línea y, más recientemente, el soporte de decisiones de gestión de tráfico en línea (en tiempo real). En cualquier caso, el uso de Aimsun o Aimsun Online tiene como objetivo proporcionar soluciones a problemas operativos y de planificación a corto y mediano plazo	Tiene como objetivo proporcionar soluciones a problemas operativos y de planificación a corto y mediano plazo. Las señales de tráfico pueden ser fijas, es decir, definidas en avanzado y permanecer sin cambios durante el período de simulación, o accionadas.	Para el control de tráfico la simulación microscópica y mesoscópica necesitan planes de control de tráfico durante el período de simulación para todas las intersecciones señalizadas y para cualquier medición de rampa incluida en el modelo.
TRANSMODELER	Balakrishna <i>et al.</i> (2007)	Mueve vehículos individuales asociados con el origen y destino específicos del viaje y las características de comportamiento del conductor. Estos vehículos interactúan con el suministro de red variable en el tiempo que representa las carreteras y los mecanismos de control.	Cada vehículo toma estas decisiones hasta que llega a su destino previsto. La evolución espacial y temporal del tráfico es un resultado directo de estas decisiones desagregadas agregadas en la población de creadores de viajes. simula el flujo de tráfico en una red única que puede abarcar diversos tipos de instalaciones, incluidas calles locales, arterias urbanas, autopistas y rampas.	Si el modelador proporciona penalizaciones de giro y flujos en una tabla de movimiento de giro de entrada que son consistentes con la configuración de simulación y retroalimentación, los usará. Sin embargo, cuando no se define una tabla de movimiento de giro o ningún campo de volumen, no se promediarán volúmenes hasta después de la segunda ejecución.

3. Hipótesis

La cola de vehículos particulares en un semáforo está más afectada por la cercanía de una parada de transporte público, al semáforo, cuando hay presencia de vehículos de carga en un 10% que cuando no los hay.

4. Objetivo

Determinar el impacto en la capacidad de la vialidad cercano a la parada de autobús en vía pública con y sin la presencia de vehículos de carga para evaluar el efecto en las filas vehiculares en un semáforo mediante el uso de un simulador.

3.1. Objetivos específicos

1. Comparar el efecto que se presenta en el tránsito vehicular cercano a una parada de autobús con y sin la presencia de vehículos de carga.
2. Identificar cuando, la presencia de los vehículos de carga es significativo en el impacto del tránsito vehicular cercano a una parada de un autobús.
3. Evaluar la capacidad de la vía con y sin presencia de vehículos de carga en cada parada de autobús seleccionada y observar su variación en términos de las filas generadas y la pérdida de capacidad.

5. Metodología

En este capítulo se presenta la descripción del procedimiento a seguir para llevar a cabo esta investigación. La metodología se divide principalmente en cuatro pasos, el primero referente a la elección de las secciones a estudiar, éstas deben encontrarse controladas por un semáforo y contar con una parada de autobús en funcionamiento, el segundo es la recopilación de datos, tanto de aforos vehiculares, tiempos semafóricos y geometría de la vialidad, la tercera es la simulación de las condiciones de tráfico, esta parte se refiere a alimentar el *software* con la información recabada en el punto anterior, además calibrar y validar el modelo para que realmente represente las condiciones reales de la vialidad y

finalmente es la creación de distintos escenarios para observar su comportamiento y como afecta en las filas vehiculares, por último se encuentra la etapa de análisis de resultados donde se correlaciona las filas generadas con la presencia de los vehículos de carga. En la figura 5.1 se muestra el esquema del proceso a seguir en la metodología.

5.1. Esquema de la metodología

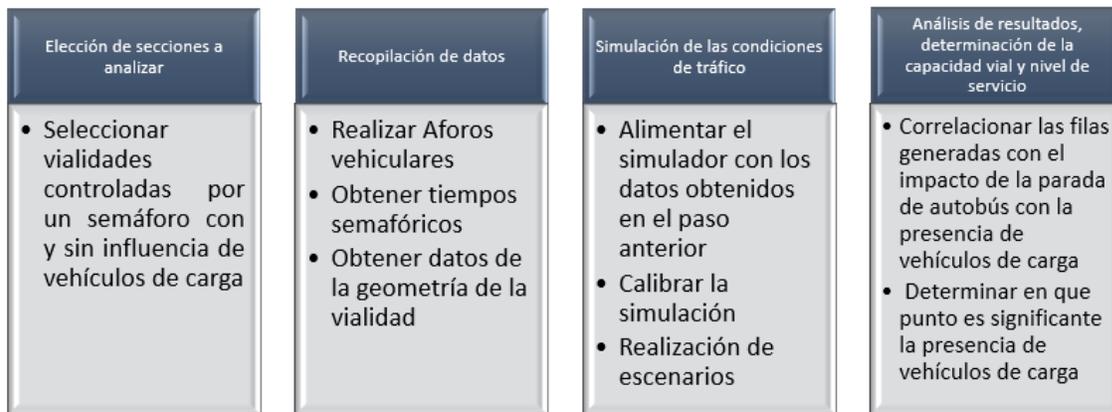


Figura 5.1: Esquema del proceso de la metodología

5.2. Elección de secciones a analizar

Se van eligieron cuatro secciones que cumplieron los requisitos para la finalidad del estudio, dos paradas de autobús con presencia significativa de vehículos de carga y dos sin presencia de vehículos de carga, al mismo tiempo, tienen que ser de similares condiciones, es decir, número de carriles, mismo tipo de parada de autobús, que en este caso es en vía pública y la misma cercanía de la parada a la intersección, el tránsito se espera que varíe ya que es parte del estudio como afectan todas esas variables.

Primeramente, se eligió las paradas que se encuentran en 5 de febrero y Tlacote, en ambas direcciones en la ciudad de Querétaro, debido a que cuentan con una parada de autobús y el tráfico está controlado por un semáforo y tiene presencia significativa de vehículos pesados (Figuras 5.2 y 5.3), A su vez, se consideró, las siguientes dos secciones se eligieron en avenida Universidad, una con tecnológico (Figuras 5.4) y la otra con corregidora (Figuras 5.5), ya que no hay presencia de vehículos pesados de carga.



Figura 5.2: Sección ubicada en 5 de febrero y carretera a Tlacote sentido Norte-Sur (Google earth)



Figura 5.3: Sección ubicada en 5 de febrero y carretera a Tlacote sentido Sur-Norte (Google earth)

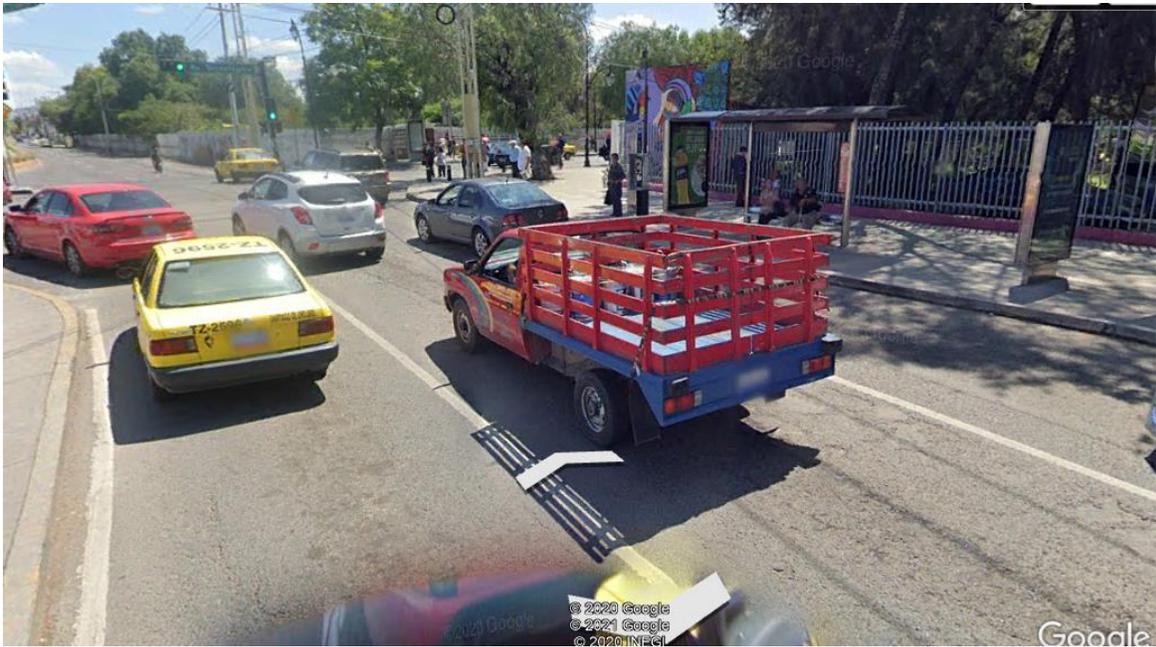


Figura 5.4: Sección ubicada en Universidad y Ave. Tecnológico (Google Earth)



Figura 5.5: Sección ubicada en Universidad y Ave. Corregidora (Google Earth)

Se eligieron estas secciones, ya que cuentan con una geometría muy similar, así como sus movimientos direccionales, lo que facilitará el análisis en esta situación.

5.3. Recopilación de datos

En este capítulo se explica cómo se obtuvieron los datos y la utilización de cada uno, antes de comenzar, es importante puntualizar la ubicación de las secciones que se

eligieron para el presente estudio, que se encuentran en el área centro de la ciudad de Santiago de Querétaro, México, las secciones ubicadas sobre 5 de febrero (color rojo y verde), existe presencia de vehículos pesados y las ubicadas sobre avenida Universidad (color amarillo y azul) no, las cuales se muestran en la Figura 5.6.



Figura 5.6: Ubicación de las secciones a estudiar

5.3.1. Geometría de la vialidad

En esta sección, es importante delimitar el número de carriles, el ancho de calzada, el ancho de carriles, los diferentes quiebres. Esto se puede llevar a un plano de AutoCAD y exportarlo al simulador a emplear, y que quede plasmado en el simulador para usarlo como base para el trazado en dicho software.

5.3.2. Volumen y velocidad del tráfico

Una de las mediciones básicas e importantes es el conteo de usuarios, es decir, vehículos particulares, motocicletas, camiones, autobuses, vehículos pesados, entre otros. Estos se llevan a cabo para conocer algunos datos como volumen, tasa de flujo, demanda y capacidad. Para obtener el aforo, este se lleva a cabo con el uso de cámaras, que fueron colocadas en los postes de los semáforos y grabaron en dos períodos en las secciones de interés, el primero fue de las 7:00 – 9:00 horas, y el segundo a las 17:00 – 19:00 horas, con la finalidad de para recolectar vídeos del tránsito, posteriormente se realizó un conteo manual en gabinete diferenciando el tipo de vehículo, así como el movimiento direccional y anotándolo en una plantilla de Excel. Para esto es necesario conocer la configuración de las vialidades, así como sus movimientos direccionales permitidos, por lo que es necesario la

utilización de un croquis. Además, se necesitan formatos impresos para capturar dicho volumen y poder diferenciarlo de su composición vehicular.

Los vídeos se obtuvieron por una grabación que dividía el total en vídeos de tres minutos, por lo tanto, durante dos horas de grabación, se obtuvieron 20 vídeos de tres minutos, entre los cuales se encontraron tres tipos de vehículos distintos; vehículos particulares, autobuses (tanto de transporte público como particulares), motocicletas, furgonetas, camiones y vehículos pesados. Todos estos datos se registraron y se dividieron en tiempos de 15 minutos. Los tiempos semafóricos se obtuvieron desde campo, midiendo la duración tanto de la duración de verde, ámbar y rojo.

5.3.3. Tiempo de permanencia y frecuencia del autobús

Aquí un dato muy importante como lo han manejado diferentes autores, como lo es el tiempo de permanencia del autobús y la frecuencia de llegada, dato que depende significativamente de la demanda del uso del sistema de transporte público, así como la cantidad de líneas disponibles, siendo así, estos motivos los que provocan los cuellos de botella más importantes en esta sección de la vialidad. Este dato se tomará como el número promedio de autobuses que llegan a la parada durante el periodo registrado, que en este caso serán las dos horas de la mañana y por separado las horas de la tarde, creando así, dos planes de transporte público, uno para el horario de la mañana y otro para el horario de la tarde, esto se registró tomando en consideración el tiempo en que el autobús estuvo detenido en el ascenso y descenso de los usuarios sin considerar el efecto del semáforo, debido a que, cuando el semáforo esta en rojo, el chofer del autobús puede aprovechar para subir y bajar pasajeros sin la necesidad de afectar el flujo vehicular.

5.4. Simulación de las condiciones de tráfico

En esta sección se simularán las condiciones reales del tráfico actual, para lo cual se tendrá que alimentar al software con los datos obtenidos, como lo es, el flujo vehicular en veh/hr por cada tipo de vehículo considerando los movimientos direccionales, crear los planes de control con forme a los tiempos semafóricos, el plan de transporte público según la frecuencia de los autobuses y el tiempo de parada y finalmente así como calibrar y validar el modelo según los parámetros de GEH modificando algunos parámetros de los distintos vehículos.

5.4.1. Alimentación del software con datos reales

En esta sección se introducirá los datos de geometría vial, demanda solicitada, datos de la parada de autobús, así como todos los vehículos y usuarios involucrados

Primeramente, la geometría de la vialidad, este parámetro se exporto del software OpenStreetMap, hacía el simulador Aimsun, posteriormente se hicieron las adecuaciones necesarias para plasmar de manera correcta los movimientos direccionales observados en la realidad. En las figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10 se observa las vialidades exportadas de OpenStreetMap hacía el simulador.

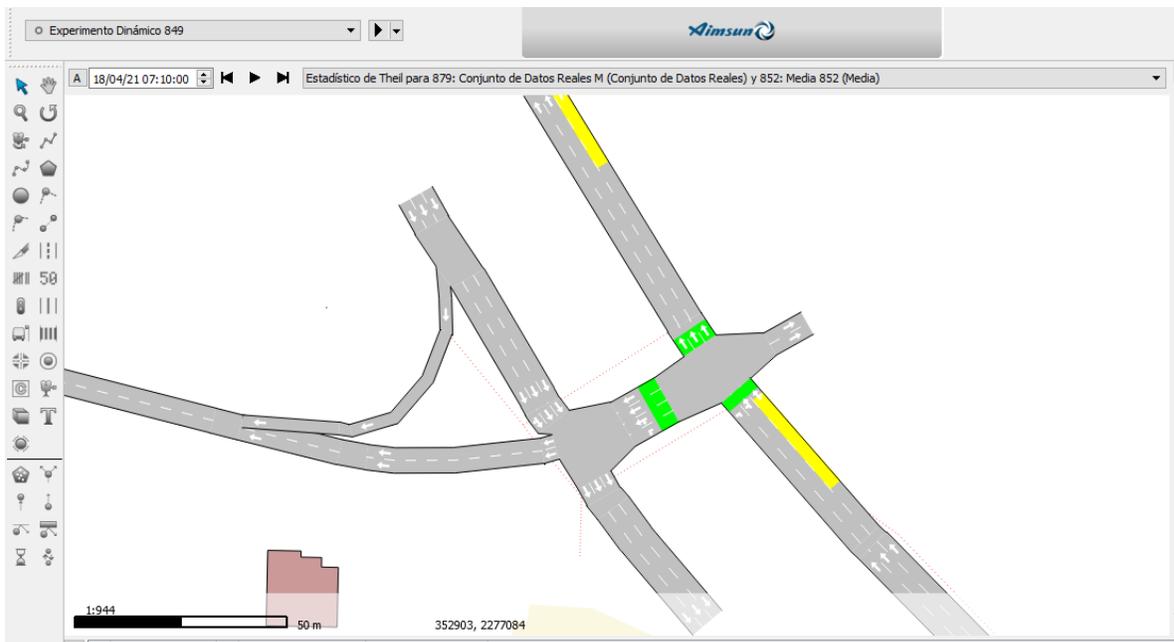


Figura 5.7: 5 de febrero y tlcote dirección Sur-Norte



Figura 5.8: 5 de febrero y tlacote dirección Norte-Sur

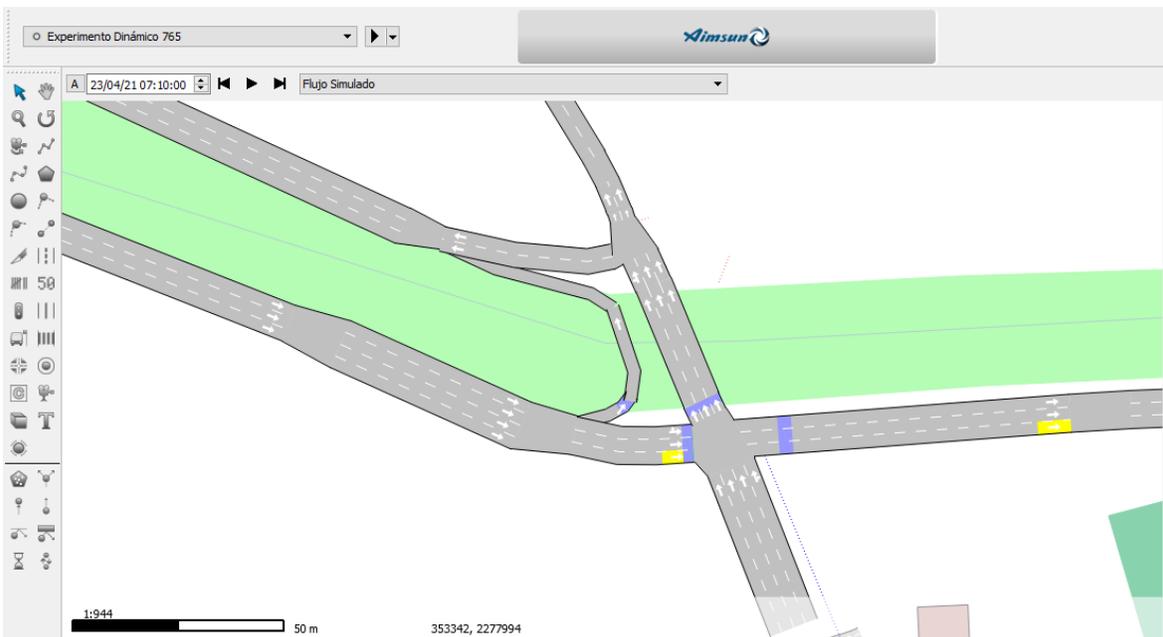


Figura 5.9: Ave. Universidad y Tecnológico

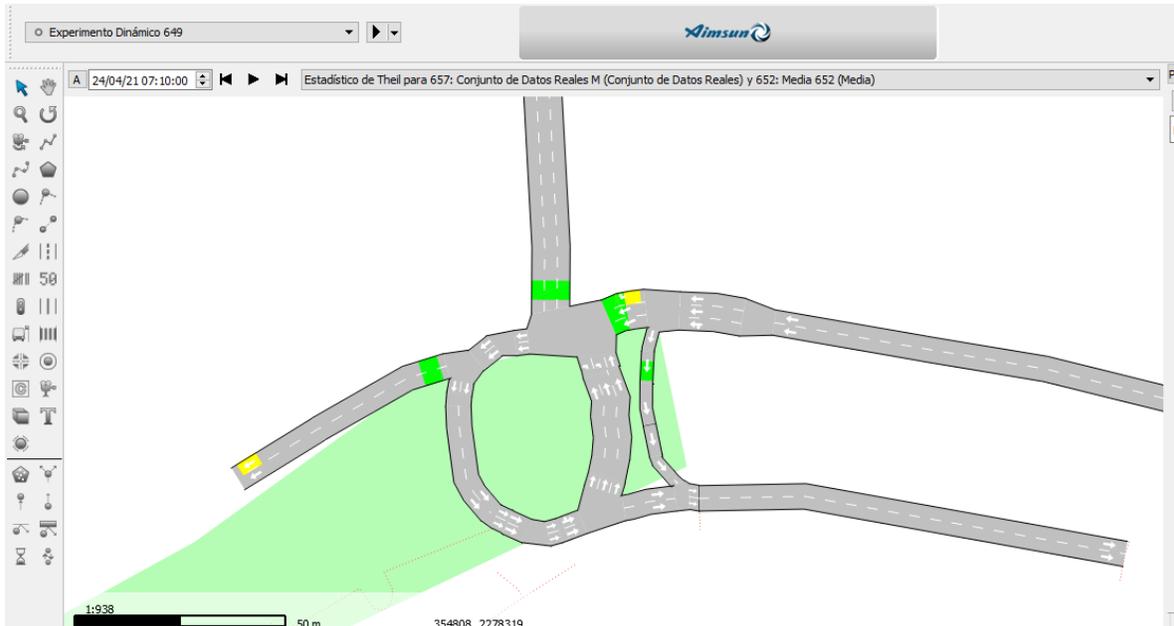


Figura 5.10: Ave. Universidad y Corregidora

Posteriormente se llevó a cabo la creación de los estados de tráfico, por practicidad, y representar de mejor manera la forma en la que se comporta el tráfico, se realizaron dos estados por cada vehículo por cada sección. En los casos del horario de la mañana, en las dos secciones ubicadas sobre 5 de febrero se utilizaron, primeramente, estados de hora y media de duración y el segundo de solamente 30 minutos, esto debido a que los tiempos semafóricos cambian y, por ende, el flujo que permite la vialidad. Sin embargo, en las dos secciones restantes se manejaron estados de tráfico con una hora de duración, dos por cada vehículo, para completar las dos horas que hay tanto en la mañana como en la tarde. En la Figura 5.11 se observa un ejemplo de la creación de los estados de tráfico.

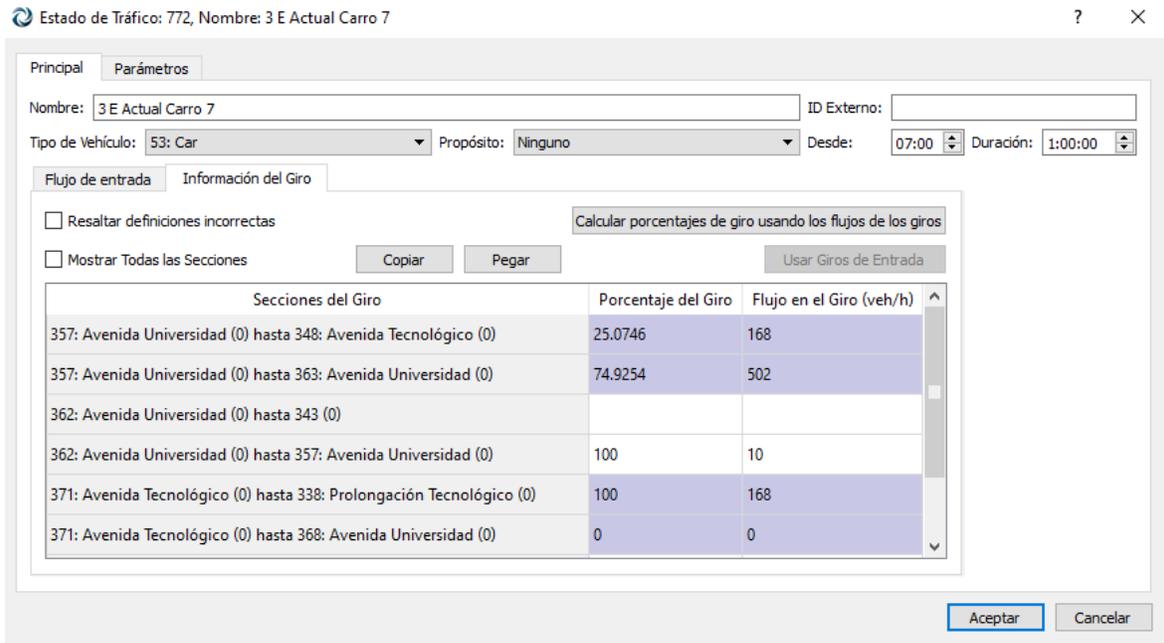


Figura 5.11: Estado de tráfico ejemplo

Para darle las características comunes de operación de los vehículos, Bokare y Maurya (2017) presentan una investigación muy detallada sobre la aceleración y desaceleración de distintos tipos de vehículos, que, para partir, antes de la calibración, es un parámetro bastante aceptable, aunque estos valores sean modificados posteriormente para representar realmente las condiciones que se observan en la realidad.

5.4.2. Calibración y validación de los datos actuales según los datos reales

En esta sección se calibrará el modelo, como ya dijimos en el capítulo 4, este es un proceso iterativo, hasta que consideramos que el modelo que presenta el simulador es muy aproximado a lo que sucede en la realidad. Para lograr ese fin, es necesario ajustar algunos factores de manera iterativa para que GEH se encuentre entre 0 y 5, sin embargo, si el sistema es muy complejo, se puede tolerar un valor entre 5 y 10. Para efectuar este paso, es necesario crear un archivo .csv en el cual contengan el conjunto de datos reales, es decir, los datos obtenidos en los vídeos durante las horas de interés, separado por intervalos de 10 minutos, por movimiento direccional y por tipo de vehículo. Por lo tanto, al momento de llevar a cabo la simulación, es necesario colocar detectores para que hacer un conteo de lo que nos arroja el simulador y hacer una comparación con lo observado en la realidad. En la Figura 5.12 se observa los detectores colocados en la sección de avenida Universidad y tecnológico, donde se puede observar cuatro detectores, el primero es el que detecta todos

los vehículos que cruzan o dan vuelta en la avenida tecnológico, el detector dos realiza el conteo de aquellos que cruzan la avenida tecnológico, el tercero aquellos que dan vuelta, eso quiere decir que, la suma de los conteos de los detectores dos y tres es igual al conteo del detector uno, finalmente, el detector cuatro realiza el conteo de aquellos vehículos que efectúan un retorno.

Estos conteos consideran cada tipo de vehículo e intervalos de tiempo de 10 minutos, siendo así, 12 intervalos por la mañana y 12 por la tarde.

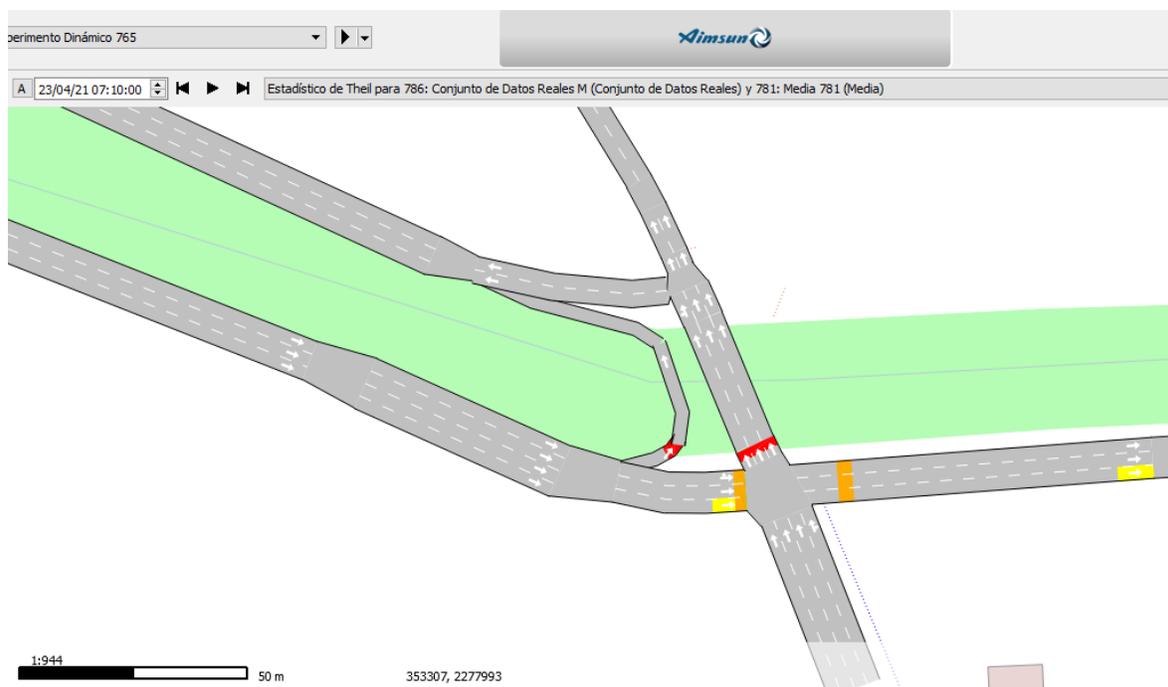


Figura 5.12: Ubicación de detectores

Para poder tener un mejor calculo al respecto, se realizaron diez replicaciones del experimento y el dato a tomar en cuenta al momento de calibrar y de observar resultados, es la media de esas tres replicaciones.

Al detectar que, en algún caso, no representa con la realidad observada, es necesario ajustar ciertos parámetros como, aceleración, desaceleración, velocidad máxima, velocidad promedio, desviación estándar, para poder adecuar el modelo de una mejor manera.

Al encontrar un GEH inferior a 5 podemos concluir que el modelo se encuentra aceptable, sin embargo, es conveniente, acercarse lo más posible a un número menor.

5.5. Realización de experimentación en simulador

Aquí se presentará el procedimiento para la realización del experimento, es decir, las diferentes variaciones de los estados de tráfico para evaluar su variabilidad en las filas vehiculares tomando en cuenta el transporte de carga, se mantendrán las características de conducción observadas en la realidad.

5.5.1. Creación de escenarios

Aquí se presentan los diferentes escenarios donde se evalúa su uso, variando la composición vehicular, en especial de los vehículos de carga y relacionarlo con las filas generadas en la intersección. En este caso se llevaron a cabo 14 experimentos por cada parada de autobús por cada horario, es decir, 14 experimentos para la parada ubicada en 5 de febrero dirección sur norte en la mañana y así con cada una en su respectivo horario. Estos 14 experimentos corresponden a la variación del transporte pesado que varía entre 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8, 2.1, 2.4, 2.7, 3.0, 6.0, 9.0, 12.0 y 15.0 % del flujo vehicular, además, en cada experimento se realizaron 10 replicaciones, esto debido a que se espera que la media se estabilice, y al agregar más replicaciones el cambio en la media de las filas vehiculares es mínimo.

5.5.2. Obtención de datos del simulador y cálculos correspondientes

Una vez obtenidos los resultados de los experimentos, se continúa con el análisis de los datos, primeramente, observando su variación y su comportamiento en gráficas de dispersión, si a primera vista puede observarse si los resultados van con relación a lo esperado. Posterior a eso, se llevó a cabo un análisis de regresión lineal múltiple tomando siendo la variable dependiente las filas vehiculares y las variables independientes, el flujo vehicular, el intervalo de paso de autobuses, el porcentaje de vehículos pesados y el tiempo de parada del autobús. Para validar la regresión se toma a consideración el coeficiente de determinación múltiple ajustado, la probabilidad de cada variable (menor a 0.05), el estadístico T, la gráfica de residuo de cada variable y la gráfica de probabilidad normal.

A su vez se hará el mismo resultado en términos de la variación del flujo que pasa por la vialidad, como va cambiando con relación al cambio del porcentaje de vehículos pesados, por lo que va variando la capacidad de la vialidad, con la diferencia que se tomará como variable el porcentaje de vehículos pesados por ser la variable de interés en este caso.

Finalmente, con los resultados obtenidos en las regresiones lineales se analizará como varía tanto las filas vehiculares como la capacidad de la vialidad y resultados de interés.

6. Resultados y discusión

6.1. Obtención de datos de campo

En esta parte, se puede resumir en las tablas de 6.1 a 6.8 se observan los resultados de la obtención de datos de campo de 5 de febrero de sur a norte, 5 de febrero de norte a sur, avenida universidad y tecnológico y avenida universidad y corregidora respectivamente tanto en los horarios de la mañana como de la tarde. Se encuentra diferenciado en intervalos horarios de 10 minutos, cada detector representa un movimiento direccional, que se irán explicando al termino de cada tabla y los conteos de los distintos tipos de vehículos donde, A representa el automóvil particular, B los autobuses, tanto del sistema de transporte público como particulares, C representa los camiones, M las motocicletas, V los vehículos tipo furgoneta y HV representa los vehículos pesados.

Tabla 6.1: Resultados observados durante la mañana en 5 de febrero de Sur-Norte

Hora fin	Detector	Conteo A	Conteo B	Conteo C	Conteo M	Conteo HV
07:10:00	D1	79	19	4	3	1
07:20:00	D1	81	19	4	2	1
07:30:00	D1	84	18	5	1	0
07:40:00	D1	89	23	5	4	0
07:50:00	D1	98	22	3	3	0
08:00:00	D1	106	21	3	3	0
08:10:00	D1	105	19	2	3	1
08:20:00	D1	109	18	2	5	0
08:30:00	D1	112	17	3	6	0
08:40:00	D1	152	19	2	4	0
08:50:00	D1	130	16	3	4	1
08:54:00	D1	108	13	4	5	1
07:10:00	D2	73	3	4	2	1
07:20:00	D2	73	2	4	1	0
07:30:00	D2	73	1	5	1	1
07:40:00	D2	71	3	4	1	0

Hora fin	Detector	Conteo A	Conteo B	Conteo C	Conteo M	Conteo HV
07:50:00	D2	81	3	3	2	0
08:00:00	D2	89	4	3	2	0
08:10:00	D2	93	3	1	2	1
08:20:00	D2	94	3	2	2	0
08:30:00	D2	96	3	3	2	0
08:40:00	D2	131	3	2	2	0
08:50:00	D2	109	3	2	1	0
08:54:00	D2	88	3	3	1	0
07:10:00	D3	6	16	0	1	0
07:20:00	D3	8	17	0	1	0
07:30:00	D3	11	17	0	1	0
07:40:00	D3	18	21	1	1	0
07:50:00	D3	17	19	0	2	0
08:00:00	D3	16	15	0	1	0
08:10:00	D3	12	16	1	1	0
08:20:00	D3	14	15	0	3	0
08:30:00	D3	17	14	0	4	0
08:40:00	D3	21	17	0	3	1
08:50:00	D3	21	13	1	3	1
08:54:00	D3	19	10	1	3	0

Tabla 6.2: Resultados observados durante la tarde en 5 de febrero de Sur-Norte

Hora fin	Detector	Conteo A	Conteo B	Conteo C2	Conteo Van	Conteo M	Conteo HV
17:10:00	D1	177	15	5	0	14	1
17:20:00	D1	194	17	4	0	13	0
17:30:00	D1	212	20	3	1	12	0
17:40:00	D1	189	18	3	3	15	1
17:50:00	D1	183	18	2	3	16	1
18:00:00	D1	177	19	2	2	16	0
18:10:00	D1	173	21	3	1	11	0
18:20:00	D1	184	16	2	1	10	0
18:30:00	D1	195	12	2	0	10	0
18:40:00	D1	183	14	2	0	11	1
18:45:00	D1	91	7	1	0	5	0
17:10:00	D2	163	2	4	0	9	0
17:20:00	D2	177	3	3	0	6	0
17:30:00	D2	192	4	2	1	5	0
17:40:00	D2	173	3	3	2	10	1
17:50:00	D2	166	3	2	2	10	1

Hora fin	Detector	Conteo A	Conteo B	Conteo C2	Conteo Van	Conteo M	Conteo HV
18:00:00	D2	159	3	2	1	10	0
18:10:00	D2	153	1	3	1	6	0
18:20:00	D2	167	2	2	0	6	0
18:30:00	D2	180	2	2	0	6	0
18:40:00	D2	165	2	2	0	7	0
18:45:00	D2	82	1	1	0	3	0
17:10:00	D3	14	13	0	0	6	1
17:20:00	D3	17	14	1	0	6	0
17:30:00	D3	20	16	2	0	7	0
17:40:00	D3	17	16	0	1	5	0
17:50:00	D3	17	15	0	1	6	0
18:00:00	D3	17	15	0	1	6	0
18:10:00	D3	20	19	0	0	5	0
18:20:00	D3	17	15	0	0	4	0
18:30:00	D3	15	10	0	1	4	0
18:40:00	D3	18	12	0	0	4	1
18:45:00	D3	9	6	0	0	2	0

En este caso, el D2 es para aquellos que giran hacia la izquierda por la avenida tlacote, D3 representa los vehículos que continúan derecho hacia el norte y el D1 es la suma de los dos anteriores, es decir, todos los vehículos que pasan por la sección, esto se representa de mejor manera en la Figura 6.1.

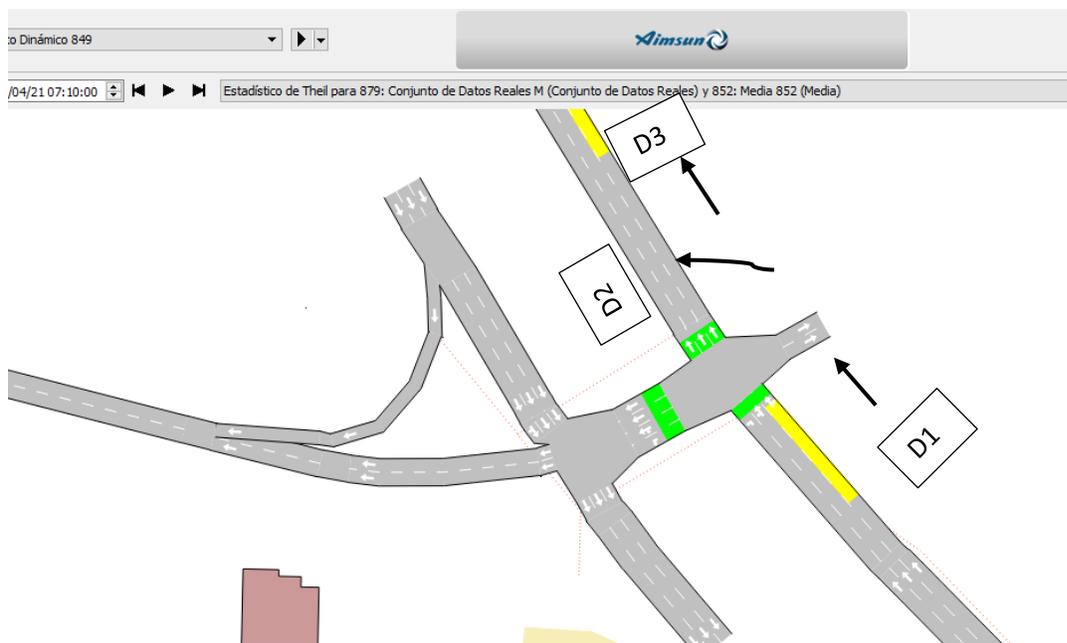


Figura 6.1: Movimientos direccionales de 5 de febrero y tlcote dirección Sur-Norte

A continuación, se presentan los datos recolectados por 5 de febrero y tlcote dirección Norte-Sur en las tablas 6.3 y 6.4 para la mañana y tarde respectivamente.

Tabla 6.3: Resultados observados durante la mañana en 5 de febrero de Norte-Sur

Hora fin	Detector	Conteo A	Conteo B	Conteo C	Conteo V	Conteo M	Conteo HV
07:10:00	D1	50	19	1	0	2	0
07:20:00	D1	51	21	2	2	2	0
07:30:00	D1	53	23	2	3	1	1
07:40:00	D1	65	22	4	3	7	0
07:50:00	D1	81	22	4	2	7	0
08:00:00	D1	96	21	3	2	8	0
08:10:00	D1	95	19	3	1	13	1
08:20:00	D1	94	21	2	1	10	0
08:30:00	D1	94	22	2	2	6	0
08:40:00	D1	115	11	3	2	16	1
08:50:00	D1	102	13	2	1	13	0
09:00:00	D1	90	14	3	0	10	0
07:10:00	D2	27	1	1	1	1	0
07:20:00	D2	27	1	1	0	0	0
07:30:00	D2	26	1	1	1	0	1
07:40:00	D2	35	1	1	0	1	0
07:50:00	D2	46	1	2	0	2	0
08:00:00	D2	56	1	2	0	2	0
08:10:00	D2	52	1	2	1	2	1
08:20:00	D2	54	2	2	0	2	0
08:30:00	D2	57	4	2	1	2	0
08:40:00	D2	70	1	2	1	6	0
08:50:00	D2	60	1	2	0	5	0
09:00:00	D2	49	1	3	0	3	0
07:10:00	D3	23	20	0	0	1	0
07:20:00	D3	25	22	1	1	2	0
07:30:00	D3	26	21	1	3	1	0
07:40:00	D3	29	21	3	3	5	0
07:50:00	D3	35	20	2	2	6	0
08:00:00	D3	41	19	1	2	6	0
08:10:00	D3	44	18	1	1	11	0
08:20:00	D3	40	18	0	0	8	0
08:30:00	D3	36	10	0	1	4	0

Hora fin	Detector	Conteo A	Conteo B	Conteo C	Conteo V	Conteo M	Conteo HV
08:40:00	D3	44	12	1	1	9	1
08:50:00	D3	43	13	0	1	8	0
09:00:00	D3	41	18	0	0	8	0
07:10:00	D4	39	1	2	2	0	0
07:20:00	D4	38	1	3	2	0	0
07:30:00	D4	36	1	5	1	1	0
07:40:00	D4	32	0	3	1	0	0
07:50:00	D4	44	0	4	1	0	0
08:00:00	D4	56	1	4	1	1	0
08:10:00	D4	46	1	4	0	0	1
08:20:00	D4	54	0	5	2	1	0
08:30:00	D4	62	1	5	5	2	1
08:40:00	D4	76	0	9	1	2	0
08:50:00	D4	57	0	5	1	2	1
09:00:00	D4	39	1	2	1	1	0

Tabla 6.4: Resultados observados durante la tarde en 5 de febrero de Norte-Sur

Hora fin	Detector	Conteo A	Conteo B	Conteo C2	Conteo Van	Conteo M	Conteo HV
17:10:00	D1	111	13	2	1	15	1
17:20:00	D1	118	16	2	1	13	0
17:30:00	D1	125	18	2	1	12	0
17:40:00	D1	111	22	1	1	10	0
17:50:00	D1	96	16	1	2	10	0
18:00:00	D1	80	9	1	1	9	0
18:10:00	D1	90	15	1	3	11	0
18:20:00	D1	91	15	2	2	10	0
18:30:00	D1	93	15	1	3	9	0
18:40:00	D1	89	15	1	2	8	0
18:50:00	D1	80	15	1	2	6	0
19:00:00	D1	71	15	0	1	4	1
17:10:00	D2	59	1	1	0	6	0
17:20:00	D2	65	1	0	0	5	0
17:30:00	D2	71	1	1	0	4	0
17:40:00	D2	50	1	1	0	2	0
17:50:00	D2	45	1	1	0	2	0
18:00:00	D2	39	0	1	0	2	0
18:10:00	D2	48	1	1	2	5	0
18:20:00	D2	47	1	1	1	4	0
18:30:00	D2	45	1	1	1	2	0

Hora fin	Detector	Conteo A	Conteo B	Conteo C2	Conteo Van	Conteo M	Conteo HV
18:40:00	D2	44	1	1	1	0	0
18:50:00	D2	39	0	0	1	0	0
19:00:00	D2	33	0	0	0	1	0
17:10:00	D3	51	12	1	1	9	1
17:20:00	D3	53	15	2	1	8	0
17:30:00	D3	55	17	1	1	8	0
17:40:00	D3	61	21	0	1	8	0
17:50:00	D3	51	15	0	2	8	0
18:00:00	D3	41	9	0	1	7	0
18:10:00	D3	42	14	0	1	6	0
18:20:00	D3	45	14	0	1	6	0
18:30:00	D3	47	14	1	2	7	0
18:40:00	D3	45	14	1	1	8	0
18:50:00	D3	41	15	0	1	6	0
19:00:00	D3	38	15	0	1	3	1
17:10:00	D4	123	0	5	0	3	1
17:20:00	D4	111	0	3	1	4	1
17:30:00	D4	100	0	1	1	5	0
17:40:00	D4	99	0	3	3	3	0
17:50:00	D4	98	0	3	2	4	0
18:00:00	D4	99	0	3	0	4	0
18:10:00	D4	111	1	1	1	3	0
18:20:00	D4	102	1	1	0	3	0
18:30:00	D4	96	0	1	1	3	0
18:40:00	D4	105	0	1	1	3	1
18:50:00	D4	93	0	1	0	2	0
19:00:00	D4	82	0	0	0	2	0

En este caso, el D2 representa el movimiento de aquellos vehículos que giraron a la izquierda, el D3 aquellos que continuaron derecho y, como en el caso anterior, el D1 la suma de estos dos, por otro lado, aquí se tiene otro movimiento, el cual los vehículos giran hacia la derecha antes de llegar a la intersección semaforizada, lo que hace este un caso especial. Todos estos movimientos se representan de mejor manera en la Figura 6.2.

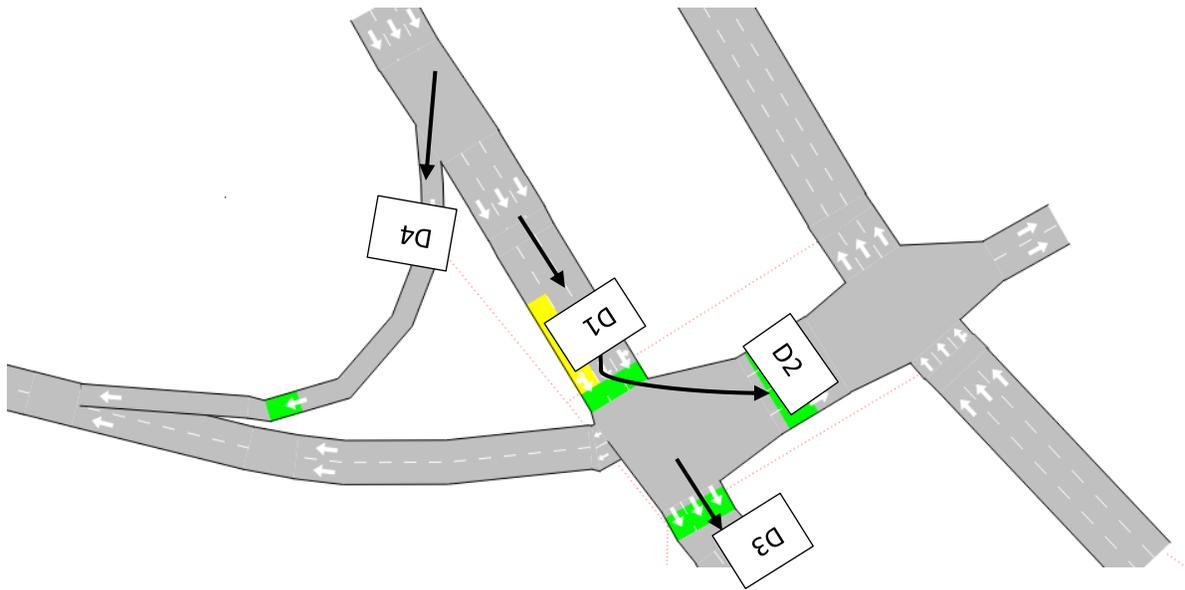


Figura 6.2: Movimientos direccionales de 5 de febrero y tlcote dirección Norte-Sur

A continuación, se presentan los datos recolectados por avenida Universidad y tecnológico en las tablas 6.5 y 6.6 para la mañana y tarde respectivamente.

Tabla 6.5: Resultados observados durante la mañana en avenida Universidad y Tecnológico

Hora fin	Detector	Conteo A	Conteo B	Conteo C2	Conteo Van	Conteo M
07:10:00	D1	69	3	3	0	4
07:20:00	D1	74	1	5	0	4
07:30:00	D1	79	1	8	1	5
07:40:00	D1	135	3	6	1	3
07:50:00	D1	149	2	5	0	3
08:00:00	D1	164	2	3	0	4
08:10:00	D1	145	1	1	1	10
08:20:00	D1	136	2	3	2	8
08:30:00	D1	128	1	4	1	7
08:40:00	D1	176	3	3	1	9
08:50:00	D1	158	2	2	2	10
09:00:00	D1	140	2	2	3	12
07:10:00	D2	47	3	2	0	4
07:20:00	D2	54	1	4	0	4
07:30:00	D2	60	1	5	0	5
07:40:00	D2	103	2	6	1	2
07:50:00	D2	114	2	4	0	3

Hora fin	Detector	Conteo A	Conteo B	Conteo C2	Conteo Van	Conteo M
08:00:00	D2	124	2	3	0	4
08:10:00	D2	99	1	1	0	9
08:20:00	D2	98	2	2	0	6
08:30:00	D2	97	1	3	1	4
08:40:00	D2	134	2	1	1	9
08:50:00	D2	117	2	1	0	10
09:00:00	D2	100	2	1	1	10
07:10:00	D3	22	0	1	0	0
07:20:00	D3	20	0	2	0	0
07:30:00	D3	19	0	2	1	0
07:40:00	D3	32	1	1	0	1
07:50:00	D3	36	0	0	0	0
08:00:00	D3	39	0	0	0	0
08:10:00	D3	47	0	0	1	1
08:20:00	D3	38	0	1	1	2
08:30:00	D3	30	0	1	1	3
08:40:00	D3	42	1	2	1	0
08:50:00	D3	41	0	1	1	1
09:00:00	D3	40	0	1	2	1
07:10:00	D4	1	0	0	0	0
07:20:00	D4	0	0	0	0	0
07:30:00	D4	0	0	0	0	0
07:40:00	D4	5	0	0	0	0
07:50:00	D4	3	0	0	0	0
08:00:00	D4	1	0	0	0	0
08:10:00	D4	5	0	0	0	0
08:20:00	D4	4	0	0	0	1
08:30:00	D4	4	0	0	0	1
08:40:00	D4	7	0	0	0	0
08:50:00	D4	7	0	0	0	1
09:00:00	D4	8	0	1	0	1

Tabla 6.6: Resultados observados durante la tarde en avenida Universidad y Tecnológico

Hora fin	Detector	Conteo A	Conteo B	Conteo C	Conteo V	Conteo M
17:10:00	D1	159	1	1	1	8
17:20:00	D1	141	2	1	0	10
17:30:00	D1	123	1	1	1	11
17:40:00	D1	135	2	1	0	11
17:50:00	D1	124	3	2	0	9
18:00:00	D1	114	3	1	0	6
18:10:00	D1	127	2	0	1	9
18:20:00	D1	138	2	0	0	9
18:30:00	D1	150	2	0	0	9
18:40:00	D1	145	1	1	0	9
18:50:00	D1	122	1	0	0	7
19:00:00	D1	98	2	1	0	5
17:10:00	D2	102	1	0	1	5
17:20:00	D2	91	2	0	0	8
17:30:00	D2	79	1	0	0	10
17:40:00	D2	94	2	1	0	8
17:50:00	D2	82	3	1	0	7
18:00:00	D2	70	3	1	0	5
18:10:00	D2	87	2	0	1	7
18:20:00	D2	86	2	0	0	8
18:30:00	D2	87	2	0	0	8
18:40:00	D2	89	1	1	0	6
18:50:00	D2	79	1	0	0	6
19:00:00	D2	70	2	0	0	5
17:10:00	D3	56	0	1	0	3
17:20:00	D3	50	0	1	0	2
17:30:00	D3	45	0	1	1	1
17:40:00	D3	41	0	0	0	3
17:50:00	D3	42	0	0	0	2
18:00:00	D3	44	0	1	0	1
18:10:00	D3	40	0	0	0	2
18:20:00	D3	52	0	0	0	1
18:30:00	D3	63	0	0	0	1
18:40:00	D3	56	0	0	0	3
18:50:00	D3	42	0	0	0	1
19:00:00	D3	29	0	1	0	0
17:10:00	D4	9	0	0	1	1
17:20:00	D4	9	0	0	0	1

Hora fin	Detector	Conteo A	Conteo B	Conteo C	Conteo V	Conteo M
17:30:00	D4	9	0	0	0	0
17:40:00	D4	9	0	0	0	0
17:50:00	D4	5	0	0	0	0
18:00:00	D4	2	0	0	0	0
18:10:00	D4	11	0	0	0	0
18:20:00	D4	7	0	0	0	0
18:30:00	D4	3	0	0	0	0
18:40:00	D4	3	0	0	0	1
18:50:00	D4	4	0	0	0	1
19:00:00	D4	4	0	0	0	0

En este caso, el D2 representa el movimiento de aquellos vehículos que siguen derecho por avenida Universidad, el D3 aquellos que giran hacia la izquierda sobre tecnológico y, como en el caso anterior, el D1 la suma de estos dos, por otro lado, al igual que en el caso anterior, aquí se tiene otro movimiento, el cual los vehículos retornan antes de llegar a la intersección semaforizada, lo que hace este un caso especial. Todos estos movimientos se representan de mejor manera en la Figura 6.3.

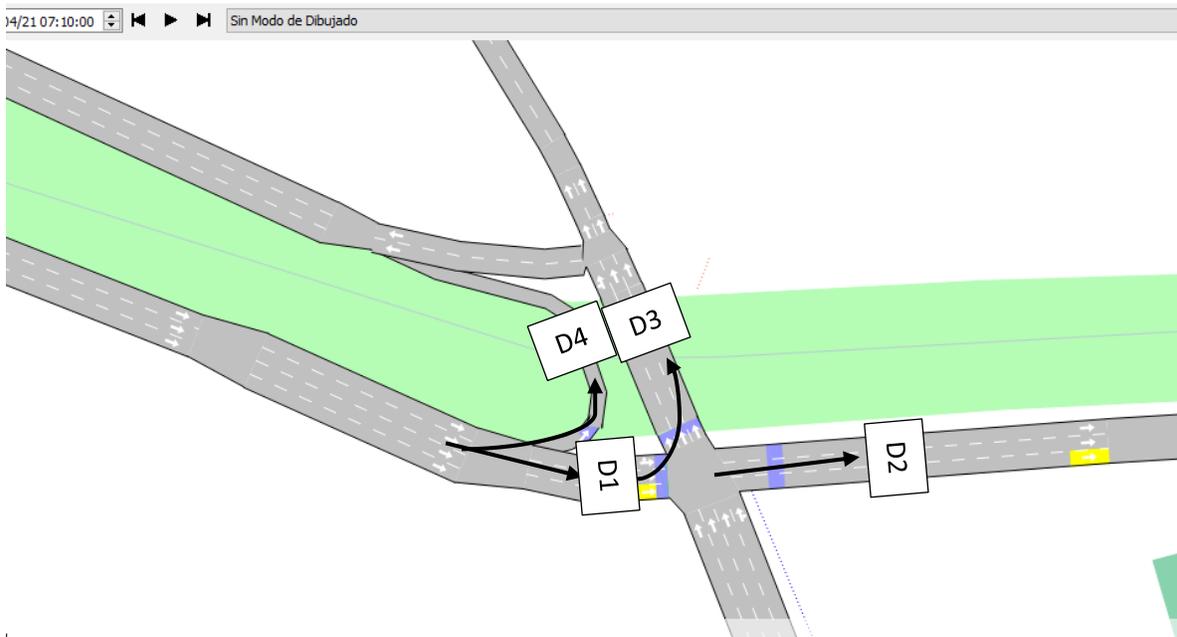


Figura 6.3: Movimientos direccionales de avenida Universidad y Tecnológico

A continuación, se presentan los datos recolectados por avenida Universidad y Corregidora en las tablas 6.7 y 6.8 para la mañana y tarde respectivamente.

Tabla 6.7: Resultados observados durante la mañana en avenida Universidad y Corregidora

Hora fin	Detector	Conteo A	Conteo B	Conteo C	Conteo M	Conteo V
07:10:00	D1	18	2	0	2	0
07:20:00	D1	25	2	0	2	0
07:30:00	D1	32	1	0	1	0
07:40:00	D1	49	3	0	2	0
07:50:00	D1	52	3	0	1	0
08:00:00	D1	55	3	0	0	0
08:10:00	D1	66	3	1	2	0
08:20:00	D1	65	3	2	2	0
08:30:00	D1	64	2	4	3	0
08:40:00	D1	72	3	0	3	0
08:50:00	D1	78	2	0	4	0
09:00:00	D1	85	2	0	3	1
07:10:00	D2	14	1	0	1	0
07:20:00	D2	19	1	0	2	0
07:30:00	D2	25	0	0	1	0
07:40:00	D2	37	0	0	1	0
07:50:00	D2	43	0	0	1	0
08:00:00	D2	49	1	0	0	0
08:10:00	D2	49	1	1	2	0
08:20:00	D2	50	1	0	2	0
08:30:00	D2	50	0	0	3	0
08:40:00	D2	55	1	2	3	0
08:50:00	D2	61	0	1	4	0
09:00:00	D2	66	1	0	3	1
07:10:00	D3	5	1	0	1	0
07:20:00	D3	6	1	0	0	0
07:30:00	D3	6	1	0	0	0
07:40:00	D3	13	3	0	1	0
07:50:00	D3	9	2	0	0	0
08:00:00	D3	5	3	0	0	0
08:10:00	D3	17	2	0	0	0
08:20:00	D3	15	2	0	0	0
08:30:00	D3	14	2	0	0	0
08:40:00	D3	17	2	2	0	0
08:50:00	D3	18	2	1	0	0

Hora fin	Detector	Conteo A	Conteo B	Conteo C	Conteo M	Conteo V
09:00:00	D3	18	1	0	0	0
07:10:00	D4	1	0	0	0	0
07:20:00	D4	2	0	0	0	0
07:30:00	D4	2	0	0	0	1
07:40:00	D4	1	0	0	0	0
07:50:00	D4	1	0	0	0	0
08:00:00	D4	1	0	0	0	0
08:10:00	D4	5	0	0	0	0
08:20:00	D4	7	0	0	0	0
08:30:00	D4	8	0	0	0	0
08:40:00	D4	8	0	0	0	0
08:50:00	D4	8	0	0	1	0
09:00:00	D4	8	0	0	1	0

Tabla 6.8: Resultados observados durante la tarde en avenida Universidad y Corregidora

Hora fin	Detector	Conteo A	Conteo B	Conteo C	Conteo M	Conteo V
17:10:00	D1	103	3	0	13	0
17:20:00	D1	102	4	0	11	0
17:30:00	D1	103	3	0	8	0
17:40:00	D1	82	3	0	8	0
17:50:00	D1	81	2	0	5	0
18:00:00	D1	81	3	1	1	0
18:10:00	D1	91	2	1	6	0
18:20:00	D1	89	2	0	6	0
18:30:00	D1	87	3	0	7	0
18:40:00	D1	96	3	0	9	0
18:50:00	D1	91	3	0	5	0
19:00:00	D1	85	3	0	2	1
17:10:00	D2	80	1	0	12	0
17:20:00	D2	77	1	0	10	0
17:30:00	D2	75	2	0	7	0
17:40:00	D2	70	1	0	5	0
17:50:00	D2	68	0	0	3	0
18:00:00	D2	65	0	1	1	0
18:10:00	D2	79	0	1	5	0
18:20:00	D2	74	0	0	5	0
18:30:00	D2	69	1	0	5	0
18:40:00	D2	81	0	0	6	0
18:50:00	D2	74	1	0	4	0
19:00:00	D2	67	1	0	1	0

Hora fin	Detector	Conteo A	Conteo B	Conteo C	Conteo M	Conteo V
17:10:00	D3	23	3	0	1	0
17:20:00	D3	25	2	0	1	0
17:30:00	D3	28	1	0	1	0
17:40:00	D3	11	2	0	3	0
17:50:00	D3	12	2	0	2	0
18:00:00	D3	14	3	0	0	0
18:10:00	D3	13	1	0	1	0
18:20:00	D3	15	2	0	1	0
18:30:00	D3	16	3	0	1	0
18:40:00	D3	14	3	0	2	0
18:50:00	D3	16	2	0	2	0
19:00:00	D3	19	2	0	1	1
17:10:00	D4	8	0	0	0	0
17:20:00	D4	12	0	0	0	0
17:30:00	D4	15	0	0	0	0
17:40:00	D4	13	0	0	1	0
17:50:00	D4	13	0	0	0	0
18:00:00	D4	12	0	0	1	0
18:10:00	D4	14	0	0	1	0
18:20:00	D4	13	0	0	1	0
18:30:00	D4	11	0	0	0	0
18:40:00	D4	9	0	0	1	1
18:50:00	D4	12	0	0	0	0
19:00:00	D4	15	0	0	0	0

En este caso, el D2 representa el movimiento de aquellos vehículos que siguen derecho por avenida Universidad, el D3 aquellos que giran hacia la izquierda sobre tecnológico y, como en el caso anterior, el D1 la suma de estos dos, por otro lado, al igual que en el caso anterior, aquí se tiene otro movimiento, el cual los vehículos retornan antes de llegar a la intersección semaforizada, lo que hace este un caso especial. Todos estos movimientos se representan de mejor manera en la Figura 6.4.

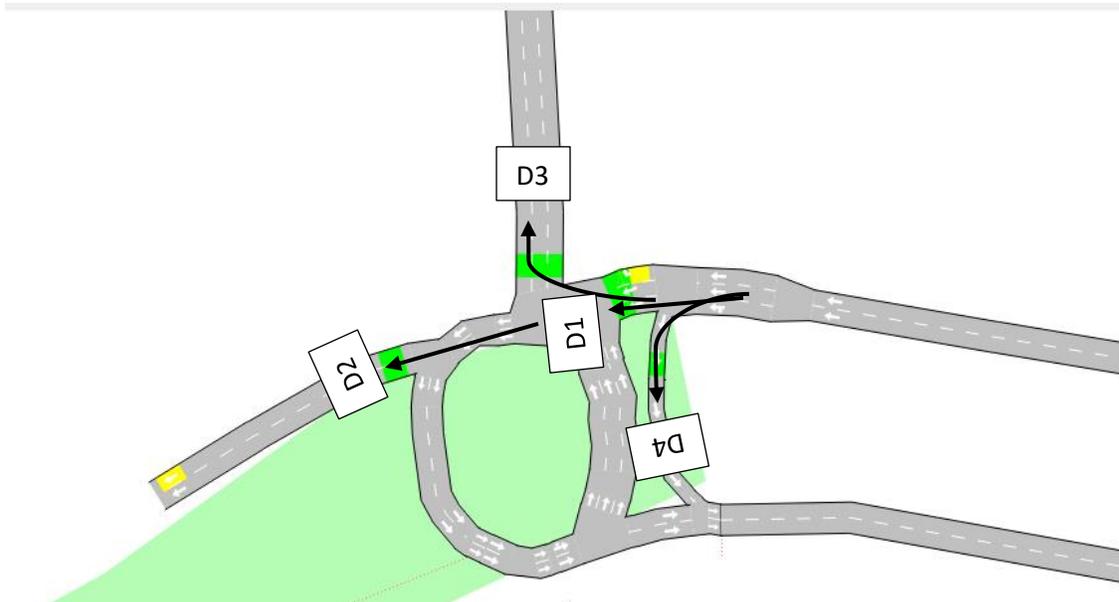


Figura 6.4: Movimientos direccionales de avenida Universidad y Corregidora

6.2. Calibración y validación

En esta parte se observan los resultados de los resultados que arroja el modelo y se compara con lo observado en la realidad, y se evalúa y determina si es significativo y realmente representa lo que ocurre en la realidad.

Tipo de Vehículo: 53, Nombre: Car

Principal Clases Características Formas 2D Formas 3D Parámetros por defecto del Experimento Combustible Emisión (QUAI)

Nombre: Car ID Externo:

	Media	Desviación	Mín	Máx
Longitud	4 m	0.50 m	3.50 m	4.50 m
Anchura	2 m	0 m	2 m	2 m
Velocidad Máxima Deseada	70 km/h	5 km/h	60 km/h	80 km/h
Aceleración Máxima	3.20 m/s ²	0.25 m/s ²	2.50 m/s ²	3.50 m/s ²
Desaceleración Normal	4 m/s ²	0.25 m/s ²	3.50 m/s ²	4.50 m/s ²
Desaceleración Máxima	6 m/s ²	0.50 m/s ²	5 m/s ²	7 m/s ²
Aceptación de Velocidad	1.10	0.10	0.90	1.30
Distancia Mínima entre Vehículos	0.85 m	0.35 m	0.50 m	1.50 m
Tiempo Máximo de Ceda el Paso	10 Segundos	2.50 Segundos	5 Segundos	15 Segundos
Aceptación de Guiado	100 %	0 %	100 %	100 %
Factor de Sensibilidad	1	0	1	1
Intervalo mínimo de tiempo entre vehículos	0 Segundos	0 Segundos	0 Segundos	0 Segundos

Permanencia en el Carril de Adelantamiento: 0.00 %

Adelantamiento por el Carril Lento: 0.00 %

Cambios de Carril Imprudentes: 0.00 %

Sensibilidad a Cambios de Carril Imprudentes: 1.00

Vehículos equipados: 0.00 %

Tolerancia de cruce: 0.80 m/s²

PCUs: 1.00

Capacidad Máxima: 4.00 Número total de personas

Figura 6.5: Características de conducción de los vehículos particulares

Así estos datos fueron ajustados para obtener los resultados que se detectaron en la realidad, en la Figura 6.6 se observa las variaciones observadas en el simulador con respecto a la realidad con los vehículos particulares, lo cual se considera aceptable por el valor tan bajo de GEH.

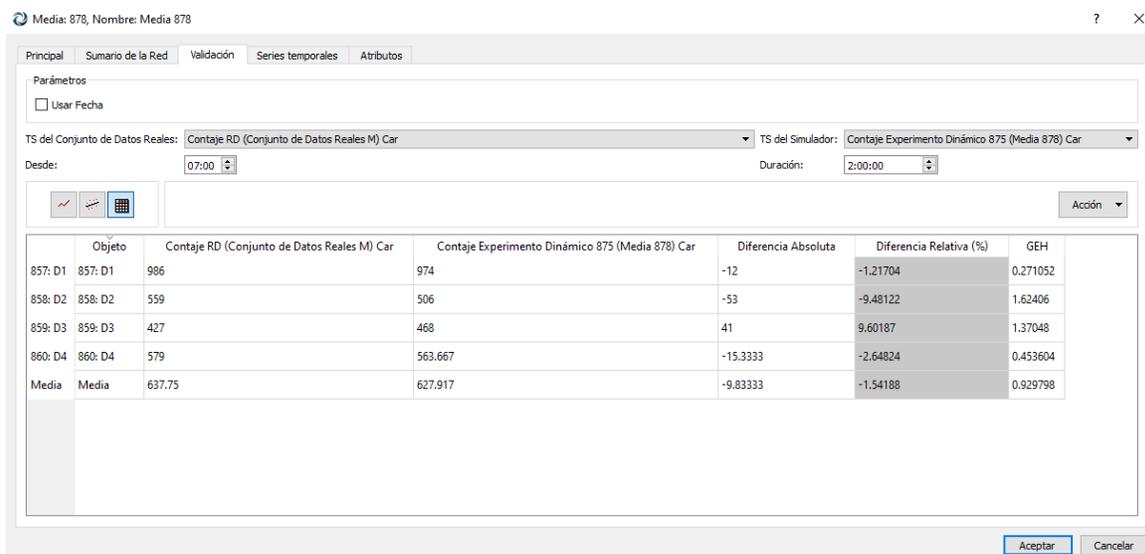


Figura 6.6: Diferencia de datos reales con respecto al experimento dinámico

6.3. Análisis de resultados

Esto se llevó a cabo para cada tipo de vehículo en cada sección, en la tabla No. 7.9 se observa un resumen de los resultados de las filas actuales para vehículos particulares en cada sección.

Tabla 6.9: Filas vehiculares registradas actualmente

Sección	Horario	Flujo vehicular (veh/h)	Intervalo de autobuses (min/b)	% de vehículos pesados	Tiempo de parada (s)	Media de vehículos en cola (veh)
5 FEB SN	Mañana	782.5	0.8	0.31%	11.1	12.74
	Tarde	1321.1	0.73	0.20%	11.12	16.21
5 FEB NS	Mañana	681	0.85	0.22%	10.5	6.11
	Tarde	749.71	0.85	0.20%	10.5	6.9
UNIV Y TEC	Mañana	881	5.72	0.00%	8.4	6.33
	Tarde	896.5	5.45	0.00%	8.4	6.8
UNIV Y CORR	Mañana	389	5.23	0.00%	9.3	3.1
	Tarde	681	3.53	0.00%	9.3	6.23

Los resultados exponen que es difícil analizar las diferencias debido a que son muchas las variables involucradas para generar un análisis más crítico es necesario observar los resultados al variar los estados de tráfico y así poder definir la afectación que tienen las variables de interés. Se varía el porcentaje de vehículos pesados de 0.30%, 0.60%, 0.90%, 1.2%, 1.5%, 1.8%, 2.1%, 2.4%, 2.7%, 3.0%, 6%, 9%, 12% y 15% modificando el número de vehículos particulares para no modificar el flujo. El resumen de los resultados se puede observar en las tablas 6.10 y 6.11 para el horario de la mañana y tarde respectivamente. Por su parte, en las tablas 6.12 y 6.13 se puede observar las variaciones en la capacidad de la vialidad al variar al cambiar el porcentaje de vehículos pesados, en este caso, y se observa de mejor manera en las figuras 6.9 y 6.10, la capacidad no varía en gran medida en las paradas ubicadas en sobre avenida Universidad, esto se debe a que, la demanda no supera la capacidad de la vialidad, caso que si sucede en las vialidades de 5 de febrero, en el que un vehículo necesita más de un ciclo semafórico para poder cruzar la sección.

Tabla 6.10: Filas vehiculares variando la porción de vehículos pesados durante la mañana

Sección	Intervalo de Autobuses (min/b)	Porcentaje de vehículos pesados (%)														
		0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0	6.0	9.0	12.0	15.0
5 FEB SN	0.8		15.7	15.04	14.6	17.4	16.7	16.7	16.9	18.6	18.8	17.1	21.5	23.6	22.2	21.7
5 FEB NS	0.85		9.1	9.2	9.4	9.3	9.8	9.6	9.4	9.4	9.4	9.5	9.8	9.9	10.1	9.8
UNIV Y TEC	5.72	7	4.4	4.2	6.7	6.8	6.9	6.8	6.9	6.8	7.0	6.9	7.2	7.3	7.4	8.6
UNIV Y CORR	5.23	3.47	3.6	3.6	3.5	3.5	3.6	3.4	3.6	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.8	4.0

Tabla 6.11: Filas vehiculares variando la porción de vehículos pesados durante la tarde

Sección	Intervalo de Autobuses (min/b)	Porcentaje de vehículos pesados (%)														
		0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0	6.0	9.0	12.0	15.0
5 FEB SN	0.73		16.2	18.0	18.0	17.6	17.2	19.01	18.5	18.6	20.6	19.7	21.0	20.1	19.2	18.5
5 FEB NS	0.85		8.9	9.3	9.4	9.4	10.2	9.3	10.2	10.8	10.9	10.1	11.5	11.1	10.4	10.0
UNIV Y TEC	5.45	6.8	7.0	7.0	7.1	7.0	7.0	7.0	6.9	7.0	7.0	6.9	7.0	7.3	7.9	8.4
UNIV Y CORR	3.53	6.3	6.2	6.6	6.5	6.6	6.7	7.2	6.7	6.9	6.9	7.0	8.4	10.4	12.8	12.6

Tabla 6.12: Capacidad vehicular variando la porción de vehículos pesados durante la mañana

Sección	Intervalo de Autobuses (min/b)	Porcentaje de vehículos pesados (%)														
		0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0	6.0	9.0	12.0	15.0
5 FEB SN	0.8		822	819	814	814	811	809	814	806	800	787	756	719	673	631
5 FEB NS	0.85		999	992	1005	998	1002	1008	991	997	998	990	997	969	935	941
UNIV Y TEC	5.72	861	857	854	854	873	861	859	860	857	862	864	885	871	858	866
UNIV Y CORR	5.23	390	388	387	384	390	396	380	387	381	389	386	388	385	386	383

Tabla 6.13: Capacidad vehicular variando la porción de vehículos pesados durante la mañana

Sección	Intervalo de Autobuses (min/b)	Porcentaje de vehículos pesados (%)														
		0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0	6.0	9.0	12.0	15.0
5 FEB SN	0.8		1257	1246	1248	1246	1247	1260	1248	1247	1269	1248	1216	1167	1106	1073
5 FEB NS	0.85		1451	1436	1454	1453	1466	1433	1456	1458	1459	1443	1369	1270	1169	1108
UNIV Y TEC	5.72	890	884	876	892	894	893	878	880	889	890	882	883	879	894	879
UNIV Y CORR	5.23	688	680	681	673	672	673	688	678	674	672	669	670	674	661	634

Para observarlo de manera más clara, las figuras 6.7 y 6.8 se observa de manera gráfica, como se comportan las filas vehiculares según la variación de los vehículos pesados en el tránsito vehicular tanto en la mañana como en la tarde respectivamente. Por su parte, en las figuras 6.9 y 6.10 se aprecia la variación de la capacidad vial en términos de vehículos/hora, con relación a los diferentes porcentajes de vehículos pesados para mañana y tarde respectivamente.

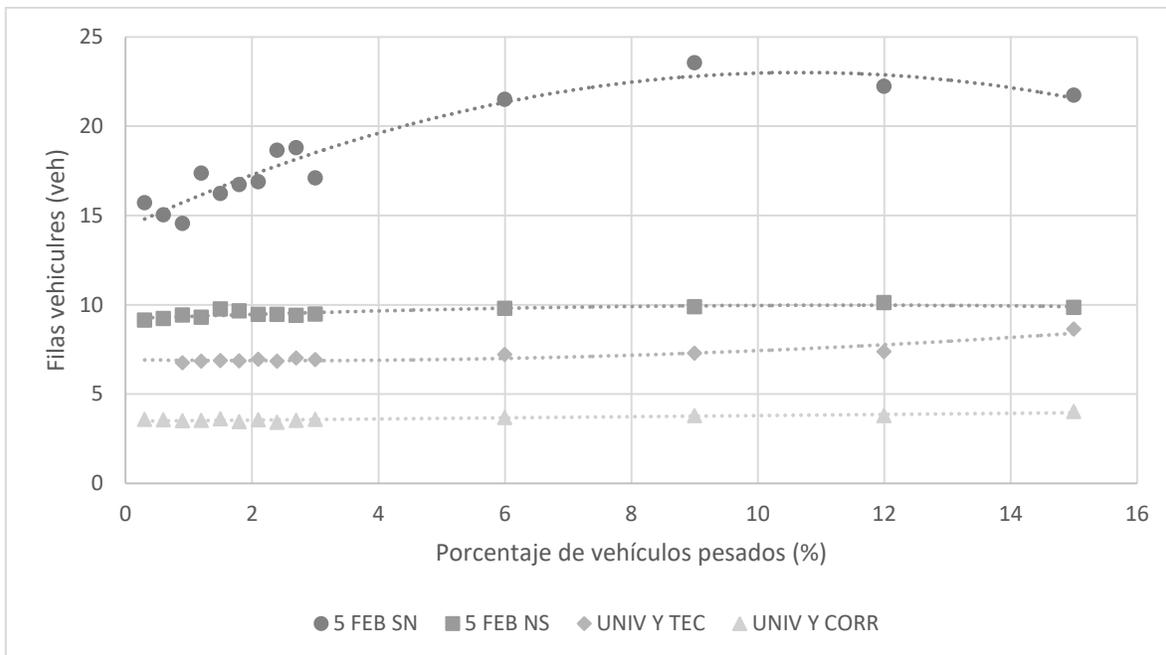


Figura 6.7: Variación de las filas vehiculares durante la mañana

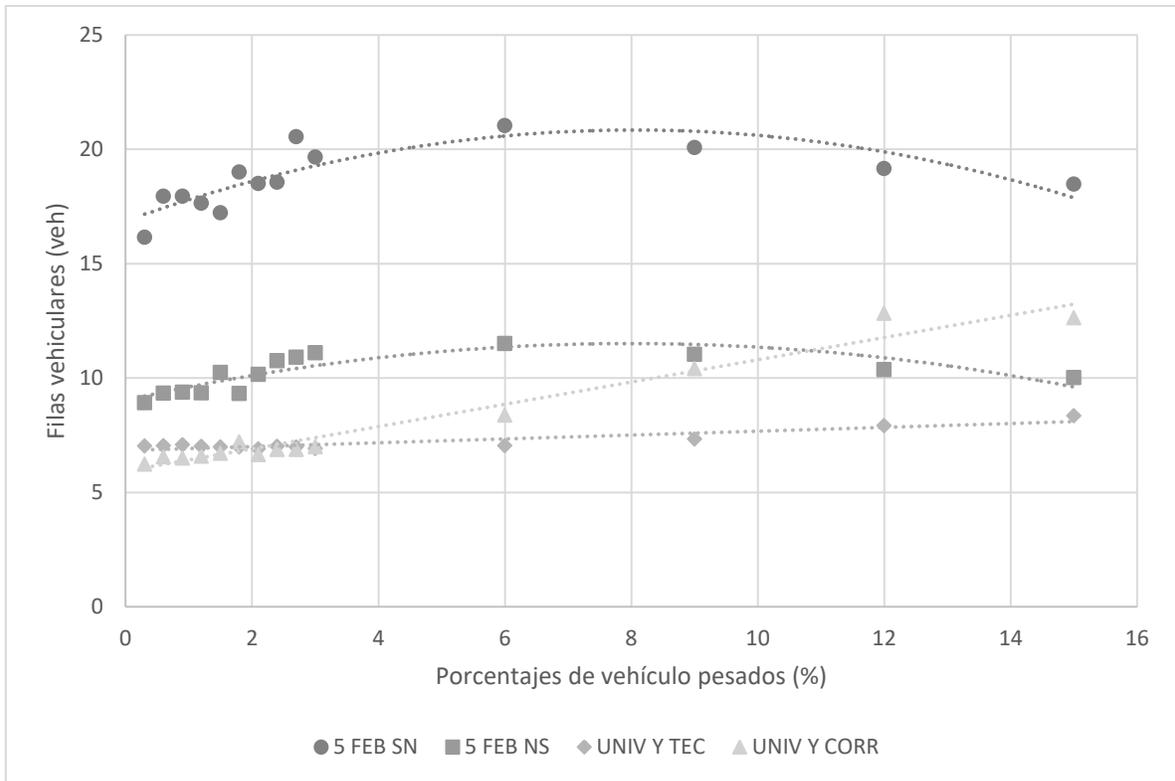


Figura 6.8: Variación de las filas vehiculares durante la tarde

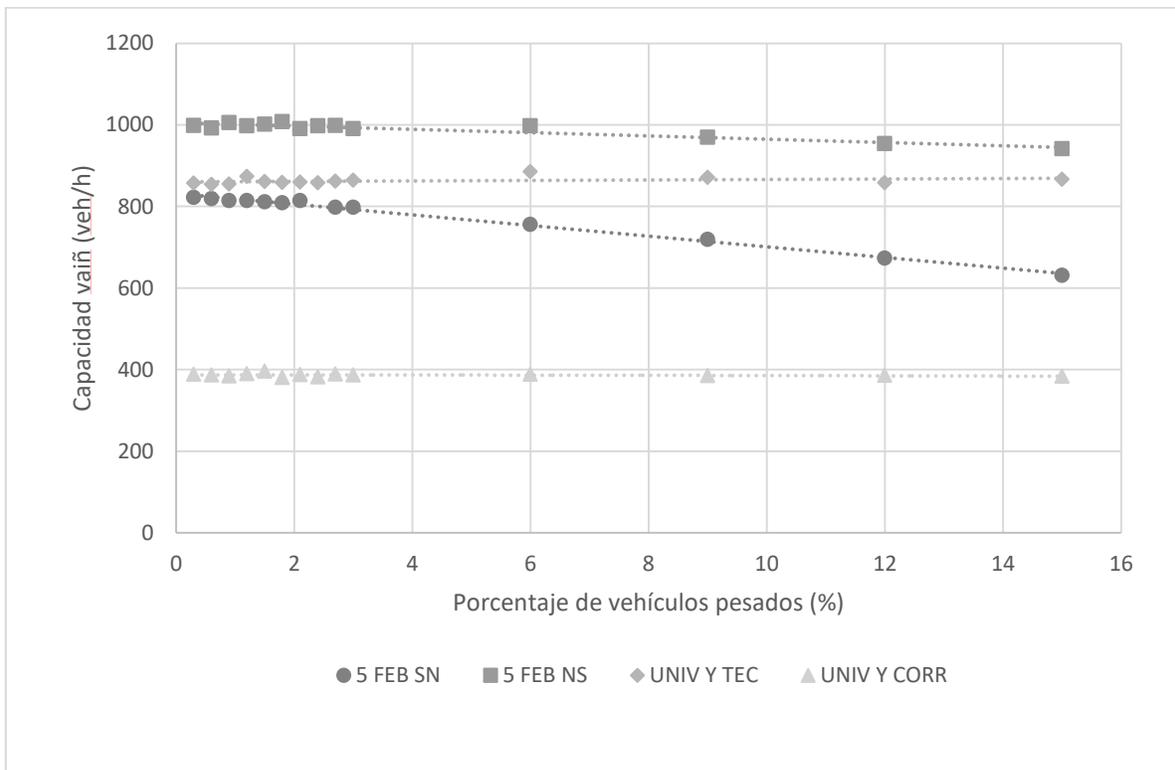


Figura 6.9: Variación de la capacidad vial durante la mañana

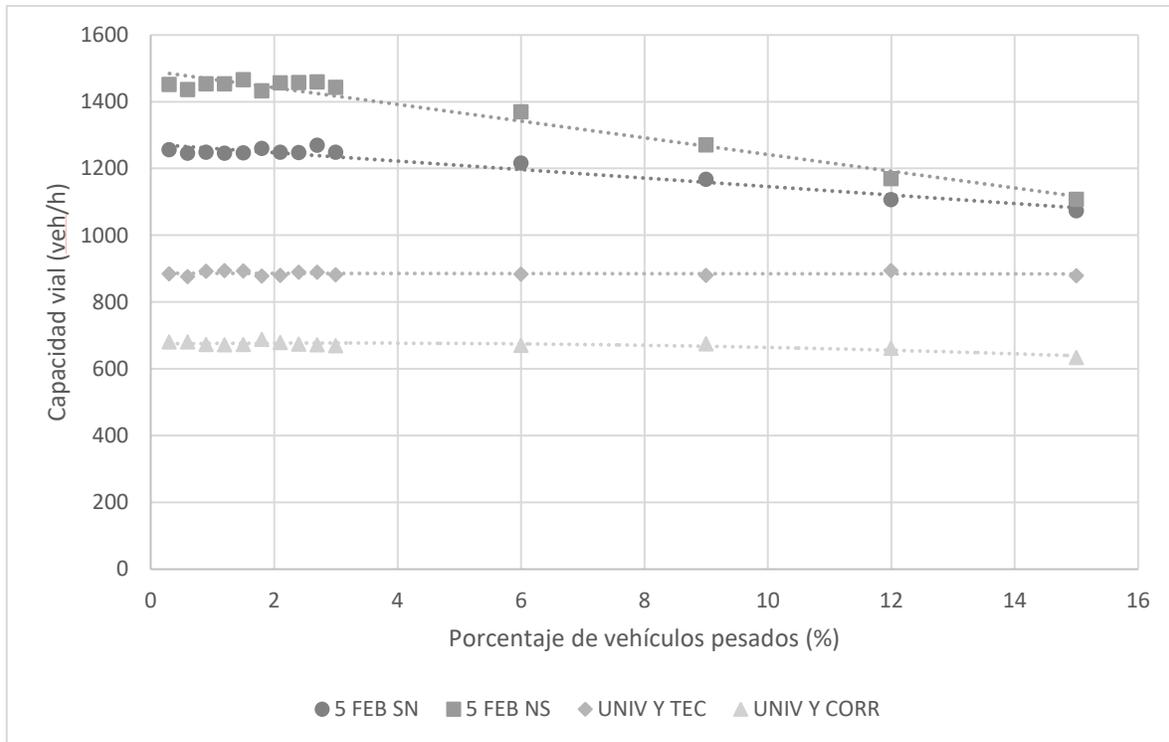


Figura 6.10: Variación de la capacidad vial durante la tarde

Se puede observar que se comportan de manera muy similar las paradas de autobús ubicadas en avenida Universidad y la de 5 de febrero NS durante la mañana, sin embargo, la sección ubicada en 5 de febrero SN, aunque tiene un comportamiento de una función cuadrática, presenta un comportamiento con respecto a las demás. En este caso es importante tener en cuenta el flujo vehicular es mucho mayor en este caso. También es importante destacar que, a pesar que la sección ubicada en 5 febrero NS presenta una mayor frecuencia de autobuses, cuando la ubicada en Universidad y Tecnológico al llegar al 15% de vehículos pesados, las filas vehiculares llegan casi al mismo punto a pesar de la gran diferencia en el intervalo de paso de autobuses que es de 0.85 y 5.75 min/b respectivamente, lo que hace notar la importancia de los vehículos pesados. Por su parte, en el horario de la tarde llama la atención como en la parada ubicada en Universidad y Corregidora, a pesar que presenta una menor fila al inicio, conforme aumenta el porcentaje de vehículos pesados, ésta aumenta considerablemente, superando por mucho las paradas ubicadas en 5 de febrero NS y Universidad y Tecnológico, esto pudiera afectar debido a que tanto el intervalo de paso de los autobuses disminuye y el flujo vehicular aumenta de manera importante en la tarde con respecto a la mañana. Por otro lado, se observa que, en

términos de capacidad vial, las paradas ubicadas en 5 de febrero se ve la reducción conforme aumentaba el porcentaje de vehículos pesados, cosa que no sucede en las paradas ubicadas en avenida Universidad, a partir de esto, se puede definir que, en aquellas paradas donde la demanda supero a la capacidad, es decir, donde es mayor el número de vehículos que esperan cruzar una vialidad a la que la vialidad misma permite, el aumento de los vehículos pesados tiene una afectación importante, por otro lado, en aquellas paradas donde la demanda no ha superado la capacidad, el aumento de vehículos pesados no afecta la capacidad de la vialidad pero si las filas.

En total se obtuvieron un total de 116 escenarios distintos, donde variaba el flujo vehicular, intervalo de paso de los autobuses, tiempo de espera y porcentaje de vehículos pesados donde se obtuvo la siguiente regresión lineal múltiple que presenta un coeficiente de determinación múltiple de 0.94 y todas sus variables presentan un estadístico p inferior a 0.01:

$$FV=0.581F - 1.184Ip + 0.175VP + 0.547TP$$

Ecuación 6.1: Cálculo de filas vehiculares

Donde:

FV = Filas vehiculares (vehículos)

F = Flujo vehicular (vehículos/minuto)

Fr = Intervalo de paso (minutos/autobús)

VP = Porcentaje de vehículos pesados (porcentaje)

TP = Tiempo de parada de autobuses (segundos)

En este caso se puede observar la gran significancia del porcentaje de vehículos pesados, además del tiempo de espera en segundos de los autobuses al subir y bajar pasajeros. Por otro lado, todas las variables cuentan con un signo positivo, excepto la frecuencia de los autobuses, esto implica que, la variación de ese dato, no es tan relevante al momento de la formación de filas vehiculares.

En las figuras de las 6.11 a la 6.14 se observan los gráficos de residuos para cada una de las variables consideradas, para el flujo vehicular, para el intervalo de paso del autobús, el

porcentaje de vehículos pesados y el tiempo de parada respectivamente, por lo que se puede observar que, los residuos de cada una de las variables oscilan en el cero, y se mantienen muy cercanos a éste, por lo tanto, se puede definir que cada una de las variables es representativa. A su vez, en la figura 6.15 se observa el gráfico de probabilidad normal, en el cual, se observa como los residuos tienen un comportamiento lineal, por lo tanto, la regresión lineal tiene un comportamiento normal.

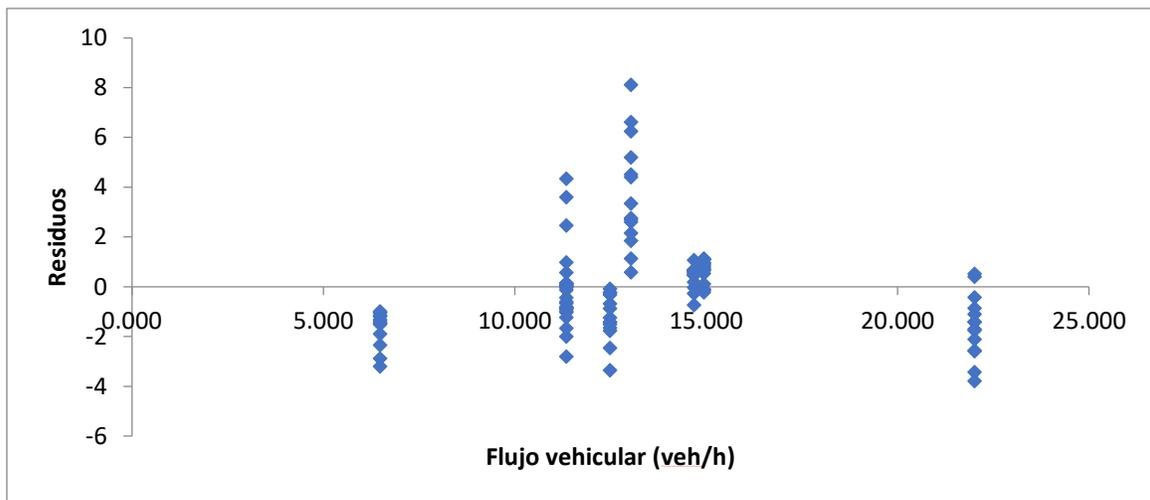


Figura 6.11: Gráfico de los residuos para la variable de flujo vehicular

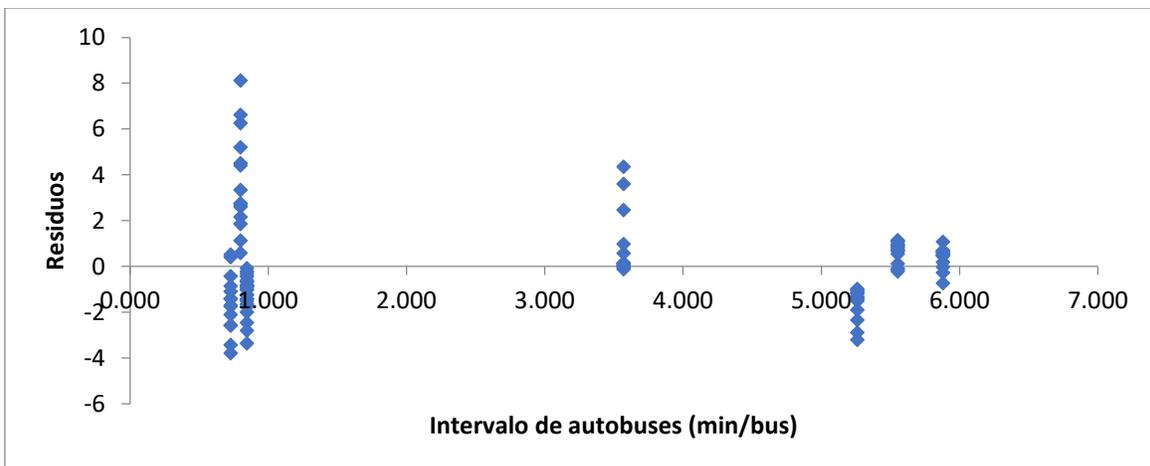


Figura 6.12: Gráfico de los residuos para la variable de intervalo de paso de autobuses

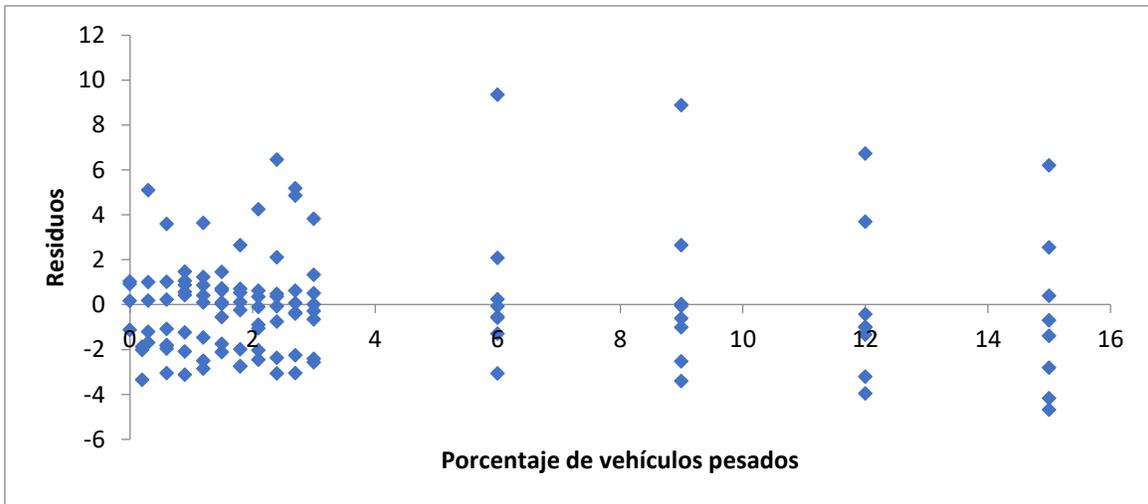


Figura 6.13: Gráfico de los residuos para la variable de porcentaje de vehículos pesados

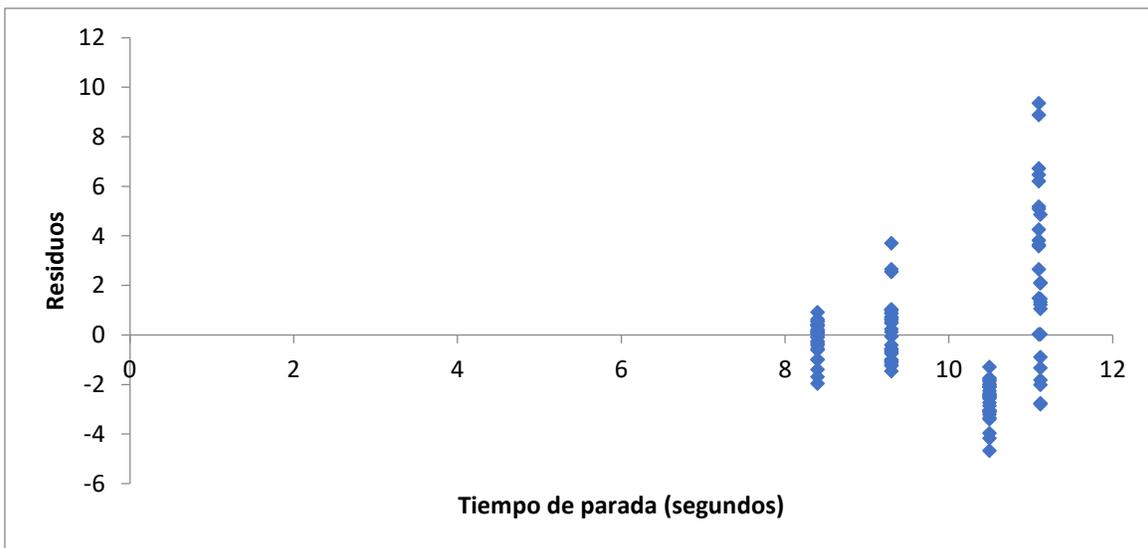


Figura 6.14: Gráfico de los residuos para la variable de tiempo de parada

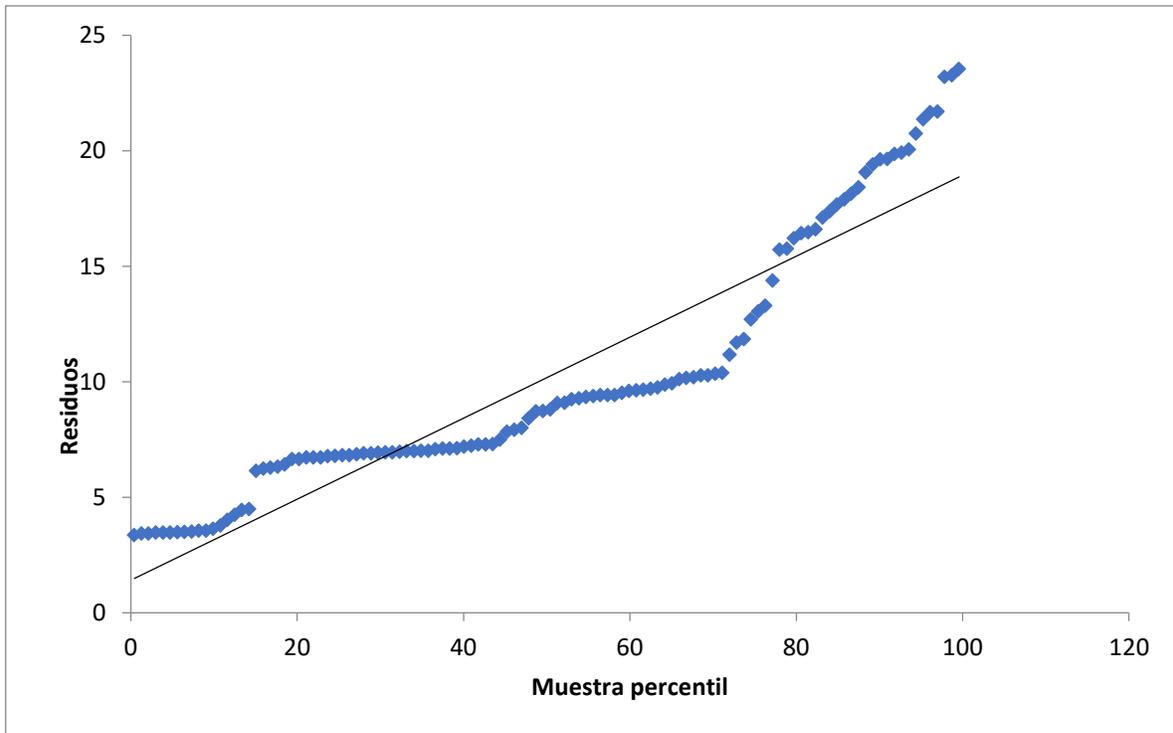


Figura 6.15: Gráfico de probabilidad normal regresión 1

Así también, se observa en la tabla 6.15 el análisis de varianza, el cual se aprecia como, tanto el caso del porcentaje de vehículos pesados como las diferentes paradas de autobús, en las cuales, el resto de las variables, son afectadas, tienen un peso importante en la formación de filas vehiculares, se aprecia en el caso que, el valor crítico para F es inferior a la F, tanto para el porcentaje de vehículos pesados, como para las diferentes paradas de autobús, así como su interacción, aunque en este último esta más cercano que los dos anteriores.. Además, la probabilidad presenta un valor inferior al 0.01 por un amplio margen, por lo tanto, tanto el porcentaje de vehículos pesados, como las diferentes condiciones que puede presentar cada parada de autobús, son significativas en la formación de filas vehiculares.

Tabla 6.14: Análisis de varianza de datos de las filas vehiculares

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
% veh pes	971.874672	13	74.7595902	34.1282776	5.7798E-71	1.72986417
Paradas de autobús	29079.2776	7	4154.1852	1896.41348	3.174E-134	2.01864738
Interacción	1302.53447	91	14.3135656	6.53424317	1.8804E-55	1.27124118
Dentro del grupo	2208.0712	1008	2.19054683			

Por su parte, con los resultados de la variación de la capacidad vial, se realizó una regresión lineal múltiple al igual que con las filas vehiculares. Pero en esta ocasión, únicamente con las secciones ubicadas en 5 de febrero debido que son aquellas secciones donde se observa una afectación, el coeficiente de determinación múltiple es de 0.98 y todas sus variables presentan un estadístico p inferior a 0.01, además, el estadístico t refleja que, el error está dentro del 95% de confiabilidad

$$\text{Cap} = F - 13.724\text{VP}$$

Ecuación 6.2: Cálculo de capacidad vial variando el porcentaje de vehículos pesados

Donde:

Cap = Capacidad vial (vehículos/hora)

F = Flujo vehicular (vehículos/hora)

VP = Porcentaje de vehículos pesados (porcentaje)

En este caso se puede observar la gran significancia del porcentaje de vehículos pesados, donde por cada porcentaje que aumenta los vehículos pesados en el tránsito vehicular, la Capacidad disminuye más de 13 vehículos/hora.

En la figura 6.16 se observa el gráfico de residuos para el porcentaje de vehículos pesados, por lo que se puede observar que, los residuos oscilan en el cero, y se mantienen muy cercanos a éste, por lo tanto, se puede definir que cada una de las variables es representativa. A su vez, en la figura 6.17 se observa el gráfico de probabilidad normal, en el cual, se observa como los residuos tienen un comportamiento lineal, por lo tanto, la regresión lineal tiene un comportamiento normal.

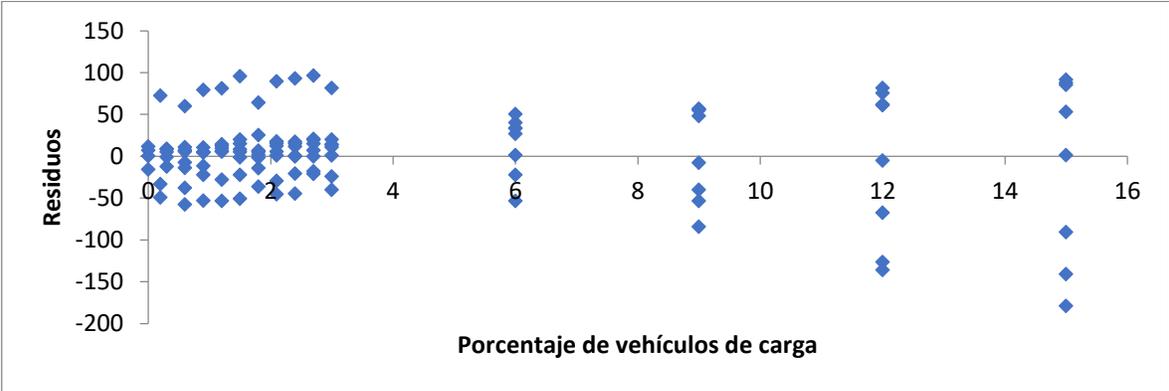


Figura 6.16: Gráfico de los residuos para la variable de porcentaje de vehículos pesados regresión 2

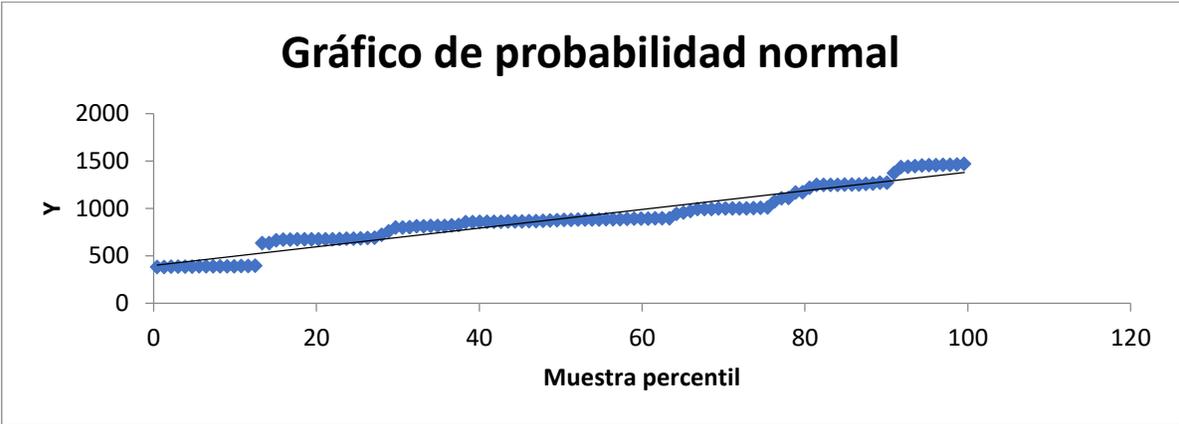


Figura 6.17: Gráfico de probabilidad normal regresión 2

7. Conclusiones

Esta investigación encuentra aplicaciones interesantes en el desarrollo de estándares relacionados con las filas vehiculares con la operación paradas de autobús con presencia de vehículos pesados, por lo tanto, sirve de herramienta para los planificadores urbanos en esta

problemática que se presenta de manera muy frecuente en los entornos urbanos, por lo cual alcanzó el objetivo planteado. Para llevarlo a cabo, se desarrollaron diversos escenarios de simulación de tráfico microscópico con información recopilada en la ciudad de Querétaro México. Posteriormente, los escenarios se utilizan para observar el comportamiento del tráfico en secciones de paradas de autobús con el fin de evaluar el impacto que provoca la variación del porcentaje de vehículos pesados en la composición vehicular en las filas vehiculares. Con resultados, se observó el comportamiento de las filas vehiculares en cada sección y se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple para predecir las filas vehiculares según el flujo vehicular, frecuencia de los autobuses, porcentaje de vehículos pesados y tiempo de espera de los autobuses: Se puede destacar lo siguiente del estudio:

- Las filas vehiculares pueden aumentar hasta un 15% si el porcentaje de los vehículos pesados aumenta tan sólo un 5%, por lo que su influencia es importante en la problemática abordada.
- Las filas vehiculares aumentan de manera más notable al momento de aumentar el porcentaje de vehículos pesados, en aquellas vialidades donde el flujo es menor y presenta un mayor intervalo de paso de los autobuses y/o el tiempo de parada es menor.
- En términos de capacidad vial, el transporte pesado tiene una influencia significativa, al disminuir en más de 13.5 vehículos/hora por cada porcentaje de este tipo de vehículos, por lo tanto, puede disminuir la capacidad, en más de un 10%, cuando los vehículos pesados representan el 15% del flujo en aquellas vialidades con un flujo menor a 2030 veh/h.
- La parada ubicada en 5 de febrero Norte – Sur presenta menor cantidad de filas vehiculares debido a pesar de tener un flujo similar a la parada en dirección Sur – Norte debido a que gran parte del tránsito no espera en el semáforo, sino que realiza una vuelta hacía avenida tlacote.
- Esto es de utilidad para una mejor planeación urbana y controlar las filas vehiculares que puedan presentarse en una vialidad, principalmente, limitando el paso del transporte pesado en horarios de mayor flujo vehicular y cuando la demanda del transporte público sea mayor.

Es necesario, tomar lo anterior en consideración para una mejor planeación urbana, para controlar las filas vehiculares que puedan presentarse en una vialidad, principalmente, limitando el paso del transporte pesado en horarios de mayor flujo vehicular y cuando la demanda del transporte público sea mayor.

Una investigación futura, se propone considerar otros factores, por ejemplo, movimientos direccionales, la presencia de ciclistas en carriles compartidos, la longitud de la parada de autobús o número de carriles en la vialidad.

8. Referencias bibliográficas

Balakrishna, R., Antoniou, C., Ben-Akiva, M., Koutsopoulos, H. N., & Wen, Y. (2007). Calibration of Microscopic Traffic Simulation Models: Methods and application. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1999(1), 198 - 207.

Ballantyne, E. E., Lindholm, M., & Whiteing, A. (2013). A comparative study of urban freight transport planning: addressing stakeholder needs. *Journal of Transport Geography*, 32, 93-101.

Bansal, P., Agrawal, R., & Geetam, T. (2014). Impacts of Bus-stops on the Speed of Motorized Vehicles under Heterogeneous Traffic Conditions: A Case-Study of Delhi, India. *International Journal of Transportation Science and Technology* vol. 3 no. 2, 167 - 178.

Barceló, J. (2010). Chapter 1: Models, Traffic Models, Simulation,. En J. Barceló, *Fundamentals of Traffic* (págs. 1-62). Barcelona: Jaume Barceló.

Barceló, J. (2010). *Fundamentals of Traffic Simulation*. En *International Series in Operations Research & Management Science*. Barcelona.

- Ben-Edigbe, J., & Mashros, N. (2011). Determining Impact of Bus-Stops on Roadway Capacity. Proceedings of the Irish Transport Research Network, 1-7.
- Betanzo-Quezada, E. (2011). Una aproximación metodológica al estudio integrado del transporte urbano de carga: el caso de la Zona Metropolitana de Querétaro en México. EURE (Santiago), 37(112), 63-87.
- Bokare, P., & Maurya, A. (2017). Acceleration-Deceleration Behaviour of Various Vehicle Types. Transportation Research Procedia 25C, 4739-4753.
- Casas, J., Ferrer, J. L., Garcia, D. P., & Torday, A. (2010). Traffic Simulation with Aimsun. En J. Barceló, Fundamentals of Traffic Simulation (págs. 173-232). Barcelona.
- Chand, S., & Chandra, S. (2014). Impact of Bus Stop on Urban Traffic Characteristics a Review of Recent Findings. Journal of Society for Transportation and Traffic Studies, 57-72.
- Chand, S., & Chandra, S. (2017). Improper Stopping of Buses at Curbside Bus Stops: Reasons. Transportation in Developing Economies, 1-9.
- Chand, S., Chandra, S., & Dhamaniya, A. (2014). Capacity Drop of Urban Arterial due to a Curbside Bus Stop . International Conference on Sustainable Civil, 19-28.
- Chavis, C., & Christofa, E. (2016). A real-time signal control strategy for mitigating the impact of bus stops at urban signalized intersections. Journal of Intelligent Transportation Systems, 349 - 363.
- Chiabaut, N., Xie, X., & Leclercq, L. (2012). Road Capacity and Travel Times with Bus Lanes and Intermittent Priority Activation. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 182-190.

- Ciuffo, B., Casas, J., Montanino, M., Perarnau, J., & Punzo, V. (2013). Gaussian Process Metamodels for Sensitivity Analysis of Traffic Simulation Models Case Study of AIMSUN Mesoscopic Model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 87-98.
- Dea, Z. P., Reddy, R. R., & Abera, G. (2019). Evaluation of the Impact of Kerb Side Bus Stop on Traffic Speed under Mixed Traffic Conditions- A Case Study in Addis-Ababa City. *International Journal of Multidisciplinary Research and Publications*, 2(1), 29-34.
- El-Geneidy, A. M., Strathman, J. G., Kimpel, T. J., & Crout, D. T. (2006). Effects of Bus Stop Consolidation on Passenger Activity and Transit Operations. *Transportation Research Record*, 10.
- Fadhloun, K., Rakha, H., & Loulizi, A. (2016). Analysis of moving bottlenecks considering a triangular fundamental diagram. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 186-199.
- Fadhloun, K., Rakha, H., & Louliz, A. (2017). Macroscopic analysis of moving bottlenecks. *The International Journal of Transportation Research*, 1-11.
- Fan, A., Chen, X., Yang, X., Kou, W., & Qi, Y. (2018). Traffic Delay Analysis near the Curbside Bus Stop Based on CPH Model. *Policy, Environment and Energy*, 3710-3719.
- Fehon, K., & Klim, T. (2010). Modeling Active Traffic Management with Paramics. *IEEE Intelligent Transportation System Magazine*, 14-18.
- Fellendorf, M., & Vortisch, P. (2010). Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM. En J. Barceló, *Fundamentals of Traffic Simulation* (págs. 63 - 93). Barcelona.
- Fitzpatrick, K., & Nowlin, R. L. (1997). Effects of Bus Stop Design on Suburban. *Transportation Research Record* 1571, 31 - 41.

- Gayah, V. V., Guler, S. I., & Gu, W. (2015). On the impact of obstructions on the capacity of nearby signalised intersections. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 48-67.
- Glick, T. B., & Figliozzi, M. A. (2017). Measuring the Determinants of Bus Dwell Time. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2647, 109-117.
- Gomes, G., Adolf, M., & Horowitz, R. (2004). Congested Freeway Microsimulation Model Using VISSIM. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 71-81.
- Gu, W., Cassidy, M. J., Gayah, V. V., & Ouyang, Y. (2012). Strategies for Mitigating Impacts of Near-Side Bus Stops on Cars. UC Berkeley: Center for Future Urban Transport: A Volvo Center of Excellence, 1-20.
- Gu, W., Cassidy, M. J., Gayah, V. V., & Ouyang, Y. (2013). Mitigating negative impacts of near-side bus stops on cars. *Transportation Research Part B*, 42-56.
- Gu, W., Gayah, V. V., Cassidy, M. J., & Saade, N. (2014). On the impacts of bus stops near signalized intersections: Models of car and bus delays. *Transportation Research Part B*, 123-140.
- Hossain, M., & Hasan, M. Z. (2000). Simulation of Bus Operation under Mixed Traffic Conditions. *Traffic and Transportation Studies*, 441 - 448.
- Jin, H., Yu, J., & Yang, X. (2019). Impact of Curbside Bus Stop Locations on Mixed Traffic Dynamics: A Bus Route Perspective. *Transportmetrica A: Transport Science*, 1-40.
- Johar, M., Keyvan-Ekbatani, M., & Ngoduy, D. (2020). Impacts of bus stop location and berth number on urban network traffic performance. *IET Intelligent Transport Systems*, 1546-1554.

- Johar, M., Keyvan-Ekbatani, M., Ngoduy, D., & Badia, H. (2019). Effects of Near-Side and Far-Side Bus Stops on NMFD of Bi-Modal Urban Network. *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 746-751.
- Keeling, K. L., Glick, T. B., Crumley, M., & Figliozzi, M. A. (2019). Evaluation of Bus-Bicycle and Bus/Right-Turn Traffic Delays and Conflicts. *Transportation Research Record*, 2673(7), 443-453.
- Kerner, B. S., & Klenov, S. L. (2010). A theory of traffic congestion at moving bottlenecks. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 43(42), 1-37.
- Koshy, R. Z., & Arasan, V. T. (2005). Influence of Bus Stops on Flow Characteristics. *Transportation Engineering* 131 (8), 640-643.
- Kumar, C., & Khatawkar, R. (2015). Impact of Road Side Bus Stops on Capacity. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, 147-157.
- Li, B., & Cao, J.-X. (2016). Impacts of Linear Bus Stops in Separation Zones on Road Capacity . 16th COTA International Conference of Transportation, 769-778.
- Li, Q., Pan, Y., Chen, L., & Cheng, C. (2011). Influence of the moving bottleneck on the traffic flow on expressway . *Applied Mechanics and Materials*, 480-484.
- Li, M., Chen, H., & Zhang, Y. (2012). Capacity Analysis of Road Segment near Bus Stop Affected by Signalized Intersection. *CICTP 2012*, 683 - 694.
- Liang, S., & Ma, M. (2018). Analysis of Bus Bunching Impact on Car Delays at Signalized Intersections. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 833–843.
- Liang, S., Ma, M., He, S., Zhang, H., & Tang, Z. (2019). Influence of bus stop location upon traffic flow. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1-22.

- Liu, L., Mao, B., Liang, X., Xu, Q., & Zhu, Y. (2015). Study of the Effect of Queuing at Curbside Bus-Stop on Road Link Capacity. 15th COTA International Conference of Transportation Professionals, 1451-1459.
- Liu, R. (2010). Traffic Simulation with DRACULA. En J. Barceló, Fundamentals of Traffic Simulation (págs. 295 - 322). Barcelona.
- Liu, R., Van Vilet, D., & Watling, D. P. (1995). DRACULA: DYNAMIC ROUTE ASSIGNMENT COMBINING USER LEARNING AND MICROSIMULATION. Proceedings of the 23rd European Transport Forum, (págs. 143-152). Londres.
- Luo, Q., Zheng, T., Wu, W., Jia, H., & Li, J. (2018). Modeling the effect of bus stops on capacity of curb lane. International Journal of Modern Physics C, 1-20.
- Mahdaviayen, M., Paquet, V., & He, Q. (2020). Using Microsimulation to Estimate Effects of Boarding Conditions on Bus Dwell Time and Schedule Adherence for Passengers with Mobility Limitations. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 146(6), 04020046.
- Molinero, A. R., & Sánchez, L. I. (2002). Transporte público: planeación, diseño, operación y administración. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Mushule, N. K. (2012). Bus bay performance and its influence on the capacity of road network in Dar Es Salaam. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 5(2), 107-113.
- Nguyen-Phuoc, D. Q., Currie, G., De Gruyter, C., & Young, W. (2017). Estimating the net traffic congestion impact associated with urban public transport – A Melbourne, Australia Case Study. Australasian Transport Research Forum 2017 Proceedings, 1-10.

- Obregón-Biosca, S. A., & Betanzo-Quezada, E. (2015). Análisis de la movilidad urbana de una ciudad media mexicana, caso de estudio: Santiago de Querétaro. *Economía, sociedad y territorio*, 15(47), 61-98.
- Owen, L. E., Zhang, Y., Rao, L., & McHale, G. (2000). Traffic Flow Simulation Using CORSIM. *Winter Simulation Conference Proceedings*, (págs. 1143 - 1147).
- Patkar, M., & Dhamaniya, A. (2020). Developing Capacity Reduction Factors for Curbside Bus Stops Under Heterogeneous Traffic Conditions. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1 - 15.
- Qian, Y.-S., Shi, P.-J., Zeng, Q., Ma, C.-X., Lin, F., Sun, P., & Wang, H.-L. (2010). A study on the effects of the transit parking time on traffic flow based on cellular automata theory. *Chin. Phys. B*, 1 - 5.
- Raj, P., Asaithambi, G., & Ravi Shankar, A. U. (2020). Effect of curbside bus stops on passenger car units and capacity in disordered traffic using simulation model. *Transportation Letters The International Journal of Transportation Research*, 1-10.
- Rao, A. M., Velmurugan, S., & Lakshmi, K. (2017). Evaluation of Influence of Roadside Frictions on the Capacity of Roads in Delhi, India. *Transportation Research Procedia* 25C, 4775–4786.
- Reddy, R. R. (2017). Evaluation of Rate of the Reduction in Road Capacity at Kerb side Bus Stop in Urban areas under Mixed Traffic conditions – a case study in Hyderabad city. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 1-8.
- Reyes, C., & Cárdenas, J. (1994). *Ingeniería de tránsito fundamentos y aplicaciones*. Ciudad de México: Alfaomega.
- Schultz, G. G., & Rilet, L. R. (2005). Calibration of Distributions of Commercial Motor Vehicles in CORSIM. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 246-255.

- SCT. (2014). Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad. Ciudad de México.
- SCT. (2018). MANUAL DE PROYECTO GEOMÉTRICO DE CARRETERAS . Ciudad de México.
- Simoni, M. D. y Claudel, C. G. (2017). A fast simulation algorithm for multiple moving bottlenecks and applications in urban freight traffic management. *Transportation Research Part B*, 104, 238-255.
- Shen, J., Qi, J., Feng, Q., & Zheng, C. (2019). Simulation of Road Capacity Considering the Influence of Buses. *IEEE Access*, 144178 - 144187.
- Sykes, P. (2010). Traffic Simulation with Paramics. En J. Barceló, *Fundamentals of Traffic Simulation* (págs. 131 - 171). Barcelona.
- Tirachini, A., Hensher, D. A., & Rose, J. M. (2014). Multimodal pricing and optimal design of urban public transport: The interplay between traffic congestion and bus crowding. *Transportation Research Part B*, 31-54.
- TRB. (2016). Highway Capacity Manual: A Guide for Multimodal Mobility Analysis Chapter 3. Barcelona.
- Wang, D., & Zhirui, Y. (2015). Effects of Bus Stop Location on Efficiency of Bus Priority for Arterials with Segmented Signal Progression Control . *CICTP 2015* , 1189 -1200.
- Wang, D., Nayan, A., & Szeto, W. Y. (2015). Optimal bus service design with limited stop services in a travel corridor. *Transportation Research Part E*, 70 - 86.
- Xiaobao, Y., Mei, H., & Ziyou, G. (2013). Car Delay Model near Bus Stops with Mixed Traffic Flow. *Journal of Applied Mathematics*, 1 - 6.

- XiaoBao, Y., ZiYou, G., BingFeng, S., & Liang, G. (2011). Car capacity near bus stops with mixed traffic derived by additive-conflict-flows procedure. *Science China Technological Sciences*, 733-740.
- Yan, X., Chen, J., Ye, X., Wang, T., Yang, Z., & Bai, H. (2020). Studying the Influences of Bus Stop Type and Specifications on Bicycle Flow and Capacity for Better Bicycle Efficiency. *Information*, 11(8), 370.
- Yang, X., Gao, Z. Z., & Si, B. (2009). Road Capacity at Bus Stops. *Research Record*, 18 - 23.
- Yang, X., Gao, Z., Guo, H., & Huan, M. (2012). Survival analysis of car travel time near a bus stop in developing countries. *Science China Technological Sciences*, 2355 - 2361.
- Yang, X.-b., Si, B.-f., & Huan, M. (2012). Mixed traffic flow modeling near Chinese bus stops and its applications . *Journal of Central South University* 19, 2697-2704.
- Yaseen, P. M. (2019). Influence on the Capacity of Thruway by Bus Stops in Pampore, Jammu and Kashmir. *The International Journal of Engineering and Science*, 50-56.
- Yong-Sheng, Q., Shi, P.-J., Qiong, Z., Chang-Xi, M., Fang, L., Peng, S., & Hai-Long, W. (2010). A study on the effects of the transit parking time on traffic flow based on cellular automata theory. *Chin. Phys. B*, 19(4), 048201.
- Yu, J., Li, Y., Wu, L., Sun, Z., & Ke, Z. (2018). Impacts of Bus Stops on Adjacent Non-Motorized Lanes Capacity. 18th COTA International Conference of Transportation Professionals, 977-987.
- Zhang, J., Li, Z., Zhang, F., Qi, Y., Zhou, W., Wang, Y., . . . Wang, W. (2018). Evaluating the Impacts of Bus Stop Design and Bus Dwelling on Operations of Multitype Road Users. *Journal of Advanced Transportation*, 1-10.

- Zhao, D., Wang, W., Yuan, Z., Ji, Y., Wang, W., & Hu, X. (2014). Evaluation of Interactions Between Buses and Bicycles at Stops. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2468(1), 11-18.
- Zhao, X.-m., Gao, Z.-y., & Jia, B. (2007). The capacity drop caused by the combined effect of the intersection and the bus stop in a CA model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 385(2), 645-658.