



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA EN SISTEMAS-INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

**MODELOS DE SIMULACIÓN PARA DOCUMENTAR LA VIABILIDAD DE UNA  
PROPUESTA CUYO OBJETIVO ES REDUCIR EL CONGESTIONAMIENTO  
VEHICULAR. UN CASO DE ESTUDIO EN COYOACÁN, CDMX.**

**T E S I S**  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
**VERÓNICA NIEVES CRUZ**

TUTOR:  
DRA. PATRICIA ESPERANZA BALDERAS CAÑAS  
POSGRADO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.,  
SEPTIEMBRE 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## JURADO ASIGNADO

Presidente:	Dra. Flores De La Mota Idalia
Secretario:	Dra. Huerta Barrientos Aida
1 er. Vocal:	Dra. Balderas Cañas Patricia E.
2 do. Vocal:	Dra. Rodríguez Vázquez Katya
3 er. Vocal:	M. I. Martínez Quintana Marco Antonio

Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado de Ingeniería

### TUTOR DE TESIS:

Dra. Patricia E. Balderas Cañas.

-----  
**FIRMA**



## Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en especial, al Posgrado de Ingeniería en Sistemas por darme la oportunidad de estudiar y permitir mi formación como Maestro en Ingeniería.

Agradezco a la Coordinación General de Estudios de Posgrado (CGEP) por la beca otorgada para realizar mis estudios de Maestría.

Agradezco de manera especial a la Dra. Patricia E. Balderas Cañas, por la atención, la confianza, el apoyo y los consejos brindados desde mi ingreso al Posgrado. Por dirigir y permitir que esta tesis se desarrollara en el marco del proyecto MOVILIDAD EN CU Y SUS ALREDEDORES, cuyo objetivo es “Elaborar propuestas para mejorar la movilidad en CU y sus alrededores, en el marco de los servicios ecosistémicos”.

Agradezco a los alumnos de Facultad de Ingeniería, Sonia Yvonne Badillo Pérez y Erick Reyna Méndez, quienes participaron en el proyecto MOVILIDAD EN CU Y SUS ALREDEDORES, en la modalidad de servicio social del Programa 2020-12/81-166.

Agradezco a los miembros del jurado, Dra. Idalia Flores de la Mota, Dra. Aida Huerta Barrientos, Dra. Patricia E. Balderas Cañas, Dra. Katya Rodríguez Vázquez y al M.I. Marco Antonio Martínez Quintana, por los conocimientos compartidos a lo largo de mi estancia en la Maestría y por su valiosa contribución a la mejora de esta tesis.

## Dedicatorias

Con mucho cariño y agradecimiento, dedico esta tesis a mis padres: Ma. Carmen Cruz y Juan Manual Nieves, quienes me brindan apoyo y cariño incondicionalmente, me inculcaron valores y buenos hábitos, que me han permitido alcanzar mis metas. Sin duda, este ha sido un logro familiar.

A mi hermano, Oscar Nieves, porque siempre te recuerdo y tus recuerdos me motivan a seguir adelante y cumplir mis objetivos.

A ti, Sergio, por tu compañía, apoyo y cariño a lo largo de estos años. Por compartir tus metas conmigo y permitirme compartir y cumplir las mías.

A mis amigos del posgrado Karla, Itzel, Alejandro y Tubalcain, por su apoyo, consejos, y especialmente por su amistad.

## Resumen

Actualmente, la sociedad demanda sistemas de transporte eficientes que permitan el desplazamiento de personas y mercancías de un lugar a otro, como una necesidad primordial para su desarrollo integral, que involucra realizar actividades cotidianas, académicas, profesionales y recreativas. Por estas razones, el transporte es un factor muy importante en el desarrollo de toda región, ciudad o país, debido al impacto económico, social y ambiental que genera.

En la Ciudad de México (CDMX), diferentes sistemas de transporte y el uso de vehículos particulares se encargan de movilizar a la población, dándoles la posibilidad de realizar dichas actividades. Sin embargo, existen diversos factores que impiden la movilidad urbana eficaz, por ejemplo, el exceso de demanda en puntos específicos de la región, falta o malas condiciones de infraestructura de los sistemas de transporte público existentes que, consecuentemente impulsan el uso de automóviles particulares, aumentando el flujo vehicular en las calles, ocasionando congestión vehicular y viajes de larga duración.

El objetivo de este trabajo es analizar la viabilidad de una propuesta que implica modificar la operación de unidades de transporte público y conectar una línea del Metrobús con una terminal del STC Metro, con el fin reducir los tiempos de viaje tanto de usuarios del transporte público como de viajeros en vehículos particulares. El caso que se aborda se ubica geográficamente en los alrededores del campus Ciudad Universitaria (CU) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), donde se encuentran ubicadas dos estaciones del sistema STC Metro y cuatro estaciones del Metrobús. La propuesta recomienda la conexión entre estaciones, a través de infraestructura y unidades de Metrobús, en lugar de las rutas que actualmente operan con camiones, microbuses y combis, y no cuentan con instalaciones fijas y adecuadas para realizar paradas.

Simulación, es la principal herramienta utilizada para analizar la propuesta. Se elaboraron cuatro modelos para estudiar y comparar la situación actual y la situación propuesta. El contenido del presente trabajo se desarrolla de la siguiente manera: En el **capítulo 1** se presentan los conceptos de movilidad y transporte con el objetivo de concebir el congestionamiento vehicular como un impedimento de la movilidad urbana, el capítulo termina puntualizando las características de la situación que se aborda y los principales objetivos. El **capítulo 2** presenta una breve descripción de los sistemas de transporte público en la CDMX y las características de los viajes que actualmente se realizan, de acuerdo con los resultados de la encuesta Origen Destino 2017. Posteriormente, en el **capítulo 3**, se presentan aspectos teóricos referentes al enfoque sistémico y simulación, como herramientas que apoyan la toma de decisiones. En el **capítulo 4** se hace una descripción de la región de estudio, que incluye las generalidades de la zona, la operación actual de camiones, microbuses, vagonetas y unidades de Metrobús. Luego, el **capítulo 5** presenta la propuesta y los aspectos metodológicos considerados para la recolección, manejo y análisis de datos e información. Posteriormente, en el **capítulo 6** se presenta la estructuración de los cuatro modelos de simulación que fueron implementados para analizar la viabilidad de la propuesta: el primer modelo (M1), es una simulación de eventos discretos cuyo objetivo es estimar la demanda actual de pasajeros en recorridos de camiones, microbuses y combis; el segundo y tercer modelo (M2 y M3), son simulaciones del tipo Monte Carlo, sus objetivos son estimar el tiempo recorrido en la extensión del Metrobús propuesta y la cantidad de unidades requeridas para satisfacer la demanda actual, respectivamente; el cuarto modelo (M4), es un modelo de simulación basado en agentes que tiene como objetivo analizar el comportamiento de unidades de transporte público y vehículos particulares desde un enfoque sistémico, en una zona de la región en cuestión. Finalmente, en el **capítulo 7** se presentan las conclusiones generales del presente trabajo.

## Abstract

At the present time, society demands efficient transport systems that allow the movement of people and goods from one place to another, as a primary need for their integral development, which involves performing daily academic professional and recreational activities. For these reasons, transportation is a very important factor in the development of any region, city or country, because of the economic, social and environmental impact it generates.

In Mexico City, different transport systems and the use of private vehicles are responsible for mobilizing the population, giving them the possibility of performing these activities. However, several factors impede effective urban mobility, for example, excess demand in specific parts of the region, lack or poor infrastructure conditions of the existing public transport systems that consequently produce the use of private cars, increasing traffic flow on the streets, generating traffic congestion and long trips.

The objective of this work is to analyze the viability of a proposal that involves modifying the operation of public transport units and connecting a Metrobus line with an STC Metro terminal, in order to reduce the travel times of both users of public transport and travelers in private vehicles. The case implicated is geographically located in the surroundings of the University City campus of the National Autonomous University of Mexico, where two stations of the STC Metro and four stations of the Metrobus System are located. The proposal suggests the connection between stations of both systems, through infrastructure and Metrobus units, instead of the routes that currently operate with buses, minibuses and vans and which do not have fixed and adequate bus stop facilities.

Simulation is the main tool used to analyze the proposal. Four models were developed to study and compare the current situation and the proposed situation. The content of this paper is as follows: In **Chapter 1** the concepts of *mobility* and *transport* are presented to conceive vehicular congestion as an impediment to urban mobility, the chapter ends by specifying the characteristics of the situation involved, the hypotheses and the main objectives. **Chapter 2** presents a brief description of the public transport systems in Mexico City and the characteristics of the trips that are currently made, according to the main results of the 2017 Origin-Destination Survey. Later, in **chapter 3**, the theoretical aspects of systemic approach and simulation are provided, as tools that support decision-making. **Chapter 4** is a description of the study region in question, which includes the generalities of the area, the current operation of trucks, minibuses, vans, and Metrobús units. Then, **chapter 5** presents the proposal and the methodological aspects considered for the collection, management and analysis of data and information. Subsequently, **chapter 6** presents the structuring of four simulation models, which were implemented to analyze the viability of the proposal: the first model (M1) is a discrete-event simulation whose objective is to estimate the current demand of passengers in routes of trucks, minibuses and vans; The second and third models (M2 and M3) are Monte Carlo simulations, their objectives are to estimate the travel time in the proposed Metrobús extension and estimate the number of units required to satisfy current demand, respectively; the fourth model (M4) is an agent-based simulation model, its objective is to analyze the behavior of public transport units and private vehicles from a systemic approach, in an area of the region in question. Finally, in **chapter 7** the general conclusions of this work are presented.

## Índice

1	Introducción.....	1
1.1	Congestionamiento vehicular, un impedimento de la movilidad urbana .....	1
1.2	Movilidad urbana y congestionamiento vehicular .....	2
1.3	Descripción de la situación problemática que se aborda .....	5
1.3.1	Problemática .....	5
1.3.2	Justificación .....	5
1.3.3	Delimitación .....	6
1.3.4	Hipótesis .....	6
1.3.5	Objetivos.....	6
2	Transporte y movilidad en la CDMX .....	7
2.1	Características generales de la CDMX (Ubicación espacial y socioeconómica) .....	7
2.2	Modos de transporte en la CDMX.....	9
2.2.1	Movilidad integrada en la CDMX.....	9
2.3	Características de los viajes en CDMX.....	11
2.3.1	Viajes en la ZMVM y en la CDMX .....	11
2.3.2	Recursos disponibles para la movilidad.....	12
2.3.3	Propósito de los viajes y hora de inicio.....	15
3	Elementos teóricos de sistemas y simulación.....	16
3.1	El enfoque sistémico como herramienta para abordar problemas.....	16
3.2	Conceptos de simulación .....	19
3.2.1	Modelos de simulación.....	19
3.2.2	Actividades en el desarrollo de un estudio de simulación.....	24
3.3	Herramientas computacionales para el desarrollo de modelos de simulación.....	38
4	Descripción de la región de estudio .....	42
4.1	Características generales .....	42
4.2	Descripción de zonas.....	45
4.2.1	Descripción de la Zona 1.....	46
4.2.2	Descripción de la Zona 2.....	53
4.2.3	Descripción de la Zona 3.....	55
4.2.4	Descripción de la Zona 4.....	58
4.2.5	Descripción de la Zona 5.....	65

4.3	Operación de las rutas de transporte público .....	70
4.3.1	Recorridos de las rutas de transporte público .....	71
4.3.2	Paradas de los recorridos .....	80
4.3.3	Propósito de paradas principales.....	82
4.3.4	Duración y velocidad de los recorridos.....	84
4.4	Operación de la línea 1 del Metrobús.....	90
4.4.1	Descripción general .....	90
4.4.2	Velocidad de operación .....	92
4.4.3	Unidades en operación.....	93
4.4.4	Tiempo y motivo de parada.....	93
5	Propuesta y metodología .....	95
5.1	Descripción de la propuesta .....	95
5.2	Metodología .....	100
5.2.1	Recolección y organización de datos e información .....	101
5.2.2	Procesamiento y análisis de datos e información.....	108
6	Construcción y discusión de los modelos.....	114
6.1	Modelo M1 .....	114
6.2	Modelo M2 .....	133
6.3	Modelo M3 .....	143
6.4	Modelo M4 .....	151
7	Conclusiones.....	163
7.1	Cumplimiento de objetivos.....	163
7.2	Estudios prospectivos .....	165
7.3	Experiencia personal .....	166
	Referencias y Bibliografía .....	167
	APENDICES.....	171
	APENDICE A: AJUSTE DE DATOS.....	171
	Ajuste de los tiempos de parada .....	171
	Utilización de la parada .....	177
	APENDICE B: DISTRIBUCIÓN BETA .....	182
	Elementos teóricos.....	182
	Ejemplo de aplicación de la distribución beta .....	184

ANEXOS.....	187
ANEXO A: MODOS DE TRANSPORTE DE LA CDMX .....	187
ANEXO B: FORMATOS PARA ENTREVISTAS EN CETRAM UNIVERSIDAD .....	196
ANEXO C: FORMATO PARA ENTREVISTAS EN PERISUR.....	199
ANEXO D: CODIGO DEL MODELO M1.....	201

# 1 Introducción

## 1.1 Congestionamiento vehicular, un impedimento de la movilidad urbana

El transporte y la movilidad desempeñan un papel importante en el desarrollo sostenible de cualquier ciudad, región o país, debido al impacto ambiental, social y económico que generan. En la antigüedad, los principales modos de transporte terrestre fueron los animales, que eran condicionados para transportar un conjunto de bienes en un solo recorrido. Con el paso del tiempo, la creatividad y necesidad de transportar mayor cantidad de personas o mercancía, surgieron nuevos modos de transporte con mayor capacidad y velocidad.

Hoy en día, la sociedad requiere de sistemas de transporte eficientes que permitan a su desarrollo integral, al realizar actividades cotidianas como asistir a un área de trabajo, estudio, realizar compras, salir de paseo, asistir a eventos culturales y recreativos, entre otros. Para conseguir sus objetivos, las personas usualmente realizan caminatas a pie o utilizan distintos tipos de vehículos como bicicletas, motocicletas, automóviles

Existen diversos aspectos que surgen y se relacionan al hablar de los modos de transporte en una sociedad, por ejemplo, la infraestructura y fuente energética que cada uno requiere para operar. Dos aspectos importantes que surgen con la utilización de diversos modos de transporte son la interacción que se origina entre ellos y las conexiones generadas por la movilidad urbana entre distintos puntos, a partir de la infraestructura que se crea y hace posible los traslados de un lugar a otro, por ejemplo, calles, avenidas, puentes y otras estructuras destinadas a la operación de vehículos terrestres

Por otro lado, existen diversas condiciones que impiden la movilidad urbana, en las que se encuentran involucradas situaciones y comportamientos tanto de conductores y operadores de transporte público, como de peatones y residentes locales. El exceso de demanda existente en algunas regiones, principalmente en horas pico, se convierten en un problema de congestionamiento vehicular, que genera tiempos prolongados de traslado, costos de combustible y peaje, estrés, y descontento tanto de individuos que se movilizan como de aquellas personas y organizaciones situadas dentro y en los alrededores del área congestionada.

A continuación, se presenta una serie de definiciones para los conceptos de *movilidad* y *transporte*, con el objetivo de precisar su diferencia y posteriormente concebir la problemática del congestionamiento vehicular como un impedimento a la movilidad urbana.

Ambos conceptos se han definido de diversas maneras y por diferentes autores a lo largo de los años. No existe una definición unificada, sino que su determinación es de acuerdo con el contexto en que se utilizan. Islas y Lelis (2007) proporcionan una recopilación de definiciones del concepto de *transporte*, de las cuales, las siguientes son las más generales:

“Transportar es llevar algo de un sitio a otro. Pero, normalmente, solo usamos la palabra para referirnos a distancias o cargas más o menos grandes o para hablar de los vehículos donde se realiza el transporte.”

"Es el traslado de un sitio a otro, de personas y mercancías, motivado por el hecho de que están en un lugar, pero se necesitan en otro."



Muchas otras definiciones explican la misma idea, especificando detalles adicionales sobre el sujeto que realiza la acción, cuáles son las causas y los objetivos o utilizando clasificaciones y enfoques específicos.

Por otro lado, respecto al concepto de movilidad, se presentan las siguientes definiciones:

“La movilidad es un parámetro que mide la cantidad de desplazamientos que las personas o las mercancías efectúan en un determinado sistema o ámbito socioeconómico.” (UVP, 2012)

“La movilidad es una cualidad o atributo de los individuos referida a su capacidad de movimiento.” (Ramírez, 2009)

“Es el movimiento de las personas y bienes en las ciudades, independientemente del medio que se utilice para desplazarse” (CONUEE, 2018).

“La movilidad no es solamente desplazamiento, sino que en ella se incluyen todas las condiciones que facilitan o entorpecen su realización.” (Cruz, 2018)

De acuerdo con las definiciones anteriores es claro que el concepto de transporte y movilidad tienen distintos significados, sin embargo, comúnmente se utilizan de manera errónea como sinónimos. De acuerdo con Ramírez (2009) y CONUEE (2018), la movilidad es una cualidad de las personas y bienes, mientras que el transporte es un concepto más general que además de la movilidad, involucra los medios utilizados para llevar a cabo dicho movimiento.

Ambos conceptos se refieren al desplazamiento de personas y objetos, pero la movilidad puede considerarse un componente fundamental de transporte, ya que el transportar un objeto (persona o bien) de un lugar a otro con el objetivo de situarlo en un espacio donde se requiere, implica activar la movilidad de dicho objeto y al mismo tiempo hacer uso de un medio y/o modo de transporte que facilite tal desplazamiento.

Activar la movilidad de un objeto requiere de energía, y cuando se trata de una persona o ser vivo, generalmente lo puede hacer de manera independiente mientras que los objetos sin vida no tienen dicha capacidad. Esta puede ser una razón por la que algunos autores atribuyen la cualidad de móvil únicamente a seres vivos.

Por otro lado, se encuentra el concepto *tráfico*, que se refiere al desplazamiento de personas u objetos sobre un espacio físico. Este concepto, no se refiere a una propiedad de las entidades en movimiento, ni a los modos de transporte que lo hacen posible, sino que, más bien, envuelve los conceptos de *movilidad* y *transporte* añadiendo el espacio físico en donde se lleva a cabo el movimiento y la interacción entre diferentes entidades.

## 1.2 Movilidad urbana y congestión vehicular

Como anteriormente se mencionó, la movilidad y el transporte son factores de suma importancia para el desarrollo sostenible de una ciudad, debido a los efectos sociales, económicos y ambientales que generan. En este sentido, adquieren central importancia no solo en los flujos que establecen relaciones y comunicación con otras ciudades, sino también los que operan en su interior (Cruz, 2018).

La movilidad urbana se encuentra estrechamente relacionada al movimiento cotidiano que la población requiere realizar, el cual establece vínculos de conexión entre diferentes puntos de la ciudad. Los recursos

disponibles para la movilidad no son iguales para toda la población, ya que existen sectores de bajos recursos, generalmente ubicados en la periferia, donde pocas personas cuentan con automóvil propio. En consecuencia, gran parte de la población queda sometida a los sistemas de transporte público.

Problemas inmediatos que surgen de la tendencia a favorecer los viajes en automóvil, en lugar de otros medios de transporte, son el incremento de vehículos en vías públicas, y el uso indebido de éstas como estacionamiento, lo cual repercute en la reducción de espacio para la circulación de otros vehículos (Cruz, 2018).

Por otro lado, se encuentran las unidades de transporte público que suelen generar congestión en determinados puntos debido a la operación informal, carencia de marcos legales, incapacidad técnica y la desintegración de planes y proyectos de gobiernos locales (Cruz, 2018). Asimismo, se encuentra ineficiencia en la completa estructura de los sistemas de transporte público, que comúnmente se conforman de líneas radiales y no es posible evitar las zonas de congestión al cruzar la ciudad.



*Figura 1-1 Congestionamiento vehicular en Anillo Periférico, Blvd. Adolfo López Mateos, CDMX.*

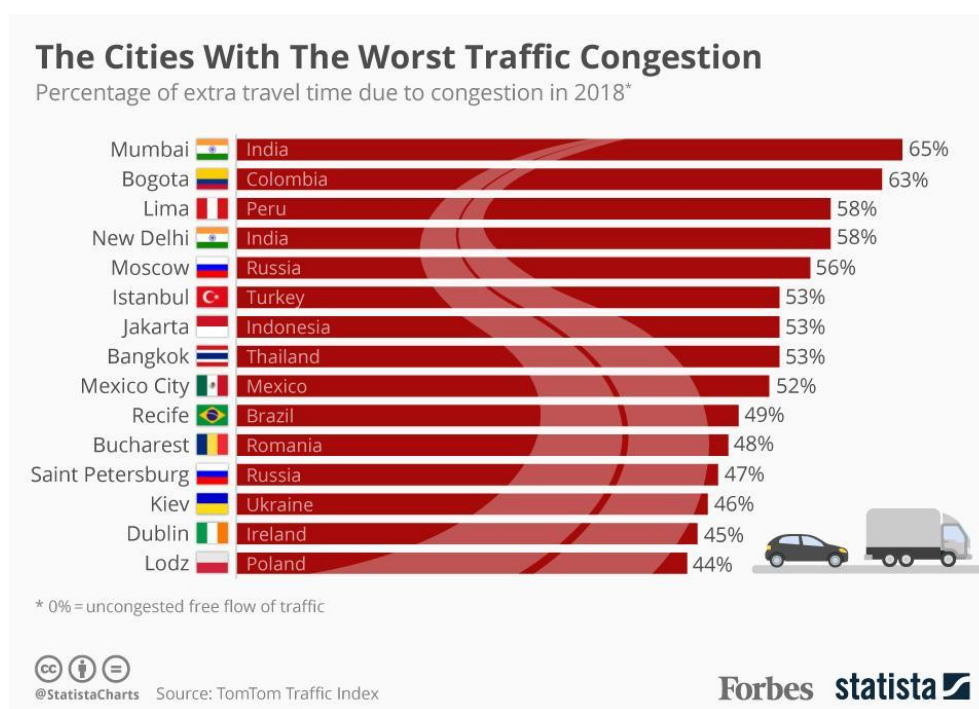
*Fotografía Tomada por la Autora (2019)*

Otro factor relacionado con el problema del congestionamiento vehicular es la concentración de oferta de empleo en polos bien definidos dentro de las ciudades, que originan necesidad de movimiento al inicio y fin de las jornadas laborales, convirtiendo la zona en un punto más de congestión vehicular. Por otro lado, se encuentran los traslados peatonales, de los cuales no existe registro estadístico confiable (Cruz, 2018), y quienes también juegan un papel importante dentro de la movilidad urbana ya que sus maniobras pueden generar accidentes viales e inestabilidad en el flujo vehicular.

La congestión vehicular, como un factor que impide la movilidad urbana eficaz, continúa incrementando de manera global y se ha convertido en un tema de interés para muchos investigadores y organizaciones. La

compañía holandesa de tecnología de navegación Tom Tom, publicó estadísticas e información sobre los niveles de congestión de 403 ciudades en 56 países (McCarthy, 2019), que indican que entre 2017 y 2018, casi el 75% de las ciudades involucradas se mantuvieron o aumentaron sus niveles de congestión. En la posición número uno se sitúa Mumbai, como la ciudad con los peores casos de congestión vehicular, donde se espera que los conductores permanecen situados en zonas de congestión un promedio del 65% del tiempo de viaje adicional.

La Gráfica 1-1 muestra la posición de las principales 15 ciudades que presentan este problema, considerando como indicador el porcentaje promedio adicional del tiempo de viaje destinado a permanecer dentro de un embotellamiento. La ciudad de México se ubica en la posición 9 como una de las ciudades que presentan mayor índice de congestión vehicular, con un 52% de tiempo promedio extra de viaje.



Gráfica 1-1 Ciudades con peor congestionamiento de tráfico.  
Fuente: (McCarthy, 2019)

Retomando la definición de *movilidad*, de Cruz (2018), enfatizamos que no se refiere únicamente al desplazamiento, sino que también involucra los elementos y entorno que la impiden o permiten. En este sentido, al hablar de movilidad se debe considerar la infraestructura existente. Por ejemplo, al hablar de transporte público, debemos considerar la infraestructura existente para su operación, que se refiere a los caminos y carreteras por donde el vehículo puede transitar, la ubicación y espacio destinada a paraderos, letreros de señalización y los semáforos que tienen como objetivo regular el flujo de vehículos. En el caso de los peatones, un ejemplo de la infraestructura que fomenta su movilidad adecuada es la construcción de puentes peatonales y las líneas de cruce peatonal sobre calles y avenidas.

La ausencia de este tipo de elementos y las situaciones antes mencionadas impiden la movilidad urbana adecuada. Sus consecuencias no solo se ven reflejadas como congestión vehicular y largos tiempos de viaje, sino que factores como el incremento de accidentes viales, el estrés, la contaminación auditiva, visual y ambiental trascienden profundamente afectando cuestiones personales y laborales de la población a través de una serie de consecuencias desencadenadas que frenan el desarrollo integral de una sociedad.

## **1.3 Descripción de la situación problemática que se aborda**

### **1.3.1 Problemática**

Como ya se mencionó anteriormente, la movilidad urbana es un factor con gran peso en el desarrollo integral de ciudades y países. La congestión vehicular, como resultado de diversos factores de conducta, incremento poblacional e infraestructura vial inadecuada, es uno de los principales obstáculos que impiden la movilidad urbana adecuada, desencadenando diversas consecuencias. Un caso particular de la problemática de congestionamiento vehicular se encuentra en la CDMX, donde existen diversas zonas de congestión, pronunciadas en horarios vinculados al inicio y fin de jornadas laborales, instituciones educativas y centros recreativos.

### **1.3.2 Justificación**

De acuerdo con la EOD (2017), la mayoría de los viajes en CDMX se realizan utilizando distintos modos de transporte público. Por ello, es importante estudiar la manera en que operan, identificar aspectos que puedan ser mejorados y proponer alternativas que resultan benéficas tanto para los usuarios como para la sociedad en general. Este trabajo centra la atención en los sistemas de transporte público concesionado que comúnmente se visualizan como sistemas ineficientes de transporte público por la falta de infraestructura, coordinación operacional, falta de capacidad técnica y educación vial por parte los conductores.

### 1.3.3 Delimitación

Como parte de la limitación de este trabajo, se consideró factible y pertinente estudiar un caso particular donde se presenta congestión vehicular en horarios pico y no el caso amplio y general existente en toda la CDMX. Se trata de la región ubicada en los alrededores del campus principal de la Universidad Nacional Autónoma de México, dentro de la delegación de Coyoacán, que involucra el tráfico de vehículos particulares, unidades de Metrobús y unidades de transporte público concesionado (referidos en adelante como “camiones”). El estudio se limita al considerar un horario de 7:00 am a 10:00 am, el cual coincide de manera general con los horarios de entrada a diversos centros de trabajo e instituciones educativas. Por otro lado, este trabajo no incluye evaluaciones de carácter económico que estimen el costo para la implementación de la propuesta, sino que, el estudio está enfocado en analizar la factibilidad para desarrollarla, incluyendo aspectos físico-espaciales para la operación de las unidades de transporte público, así como cuestiones relacionadas con los usuarios y operadores.

### 1.3.4 Hipótesis

Para el caso en particular que se aborda, se asume que una de las principales causas del congestionamiento es la cantidad excesiva de unidades de transporte público en circulación y las constantes paradas que realizan en ubicaciones donde no existe infraestructura adecuada para ello, lo que implica detener el flujo vehicular que circula detrás de las UTP. Se tiene la hipótesis de que, al reducir la cantidad de camiones en circulación, disminuirá el congestionamiento que actualmente existe y el tráfico de vehículos será fluido.

### 1.3.5 Objetivos

#### *Objetivo general*

Visualizar la situación actual de la movilidad en una región dentro de la delegación de Coyoacán, CDMX desde un enfoque sistémico y utilizar la simulación como una herramienta cuantitativa, cualitativa y visual para realizar una comparación entre la situación actual y la situación en la que una línea del Metrobús se extiende como alternativa de conexión entre una estación terminal del STC Metro y una línea del Metrobús.

#### *Objetivos específicos*

- i. Identificar los componentes del sistema y la manera en que actualmente interactúan.
- ii. Estimar tiempo y velocidad media de recorridos actuales realizados por camiones y unidades de Metrobús.
- iii. Elaborar una propuesta que modifique la operación actual de recorridos en camión y extienda el área de operación de la línea 1 del Metrobús.
- iv. Evaluar la viabilidad de la propuesta utilizando la simulación como principal herramienta.

## 2 Transporte y movilidad en la CDMX

Este capítulo se constituye de tres secciones que corresponden a una presentación contextual de la Ciudad de México<sup>1</sup> (antes Distrito Federal, D.F.), donde se aborda el caso de estudio del presente trabajo. La primera sección presenta las características más generales, la segunda sección describe los principales modos de transporte que actualmente operan en la toda la ciudad y, posteriormente, en la tercera sección se presentan las características principales de los viajes.

### 2.1 Características generales de la CDMX (Ubicación espacial y socioeconómica)

La CDMX se desempeña como centro político, económico, social y cultural de los Estados Unidos Mexicanos, por lo que es una zona urbana de gran importancia en el país. Las coordenadas geográficas y las entidades colindantes a la CDMX se muestran en la Tabla 2-1.

**Tabla 2-2 Alcaldías de la CDMX y su población.**

Clave de la alcaldía	Nombre de la alcaldía	Población total
002	Azcapotzalco	400 161
003	Coyoacán	608 479
004	Cuajimalpa de Morelos	199 224
005	Gustavo A. Madero	1 164 477
006	Iztacalco	390 348
007	Iztapalapa	1 827 868
008	La Magdalena Contreras	243 886
009	Milpa Alta	137 927
010	Álvaro Obregón	749 982
011	Tláhuac	361 593
012	Tlalpan	677 104
013	Xochimilco	415 933
014	Benito Juárez	417 416
015	Cuauhtémoc	532 553
016	Miguel Hidalgo	364 439
017	Venustiano Carranza	427 263
<b>Total:</b>		<b>8,918,653.00</b>

*Fuente: (INEGI, Encuesta Intersensal 2015, 2015).*

**Tabla 2-1 Coordenadas de ubicación geográfica y entidades colindantes de la Ciudad de México**

Orientación	Coordenadas	Entidad colindante
Norte	19°35'34"	Estado de México
Sur	19°02'54"	Morelos
Este	98°56'25"	Estado de México
Oeste	99°21'54"	Estado de México

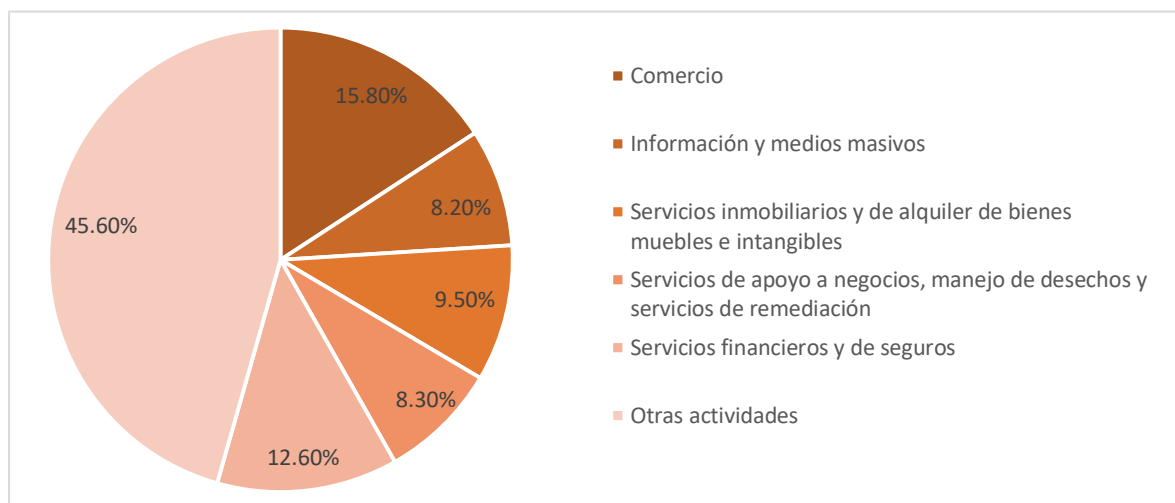
*Fuente: (INEGI, Anuario estadístico y geográfico de la Ciudad de México 2017, 2017)*

El territorio de la Ciudad de México tiene una extensión de 1, 499 kilómetros cuadrados, que representa el 0.08% del total del territorio nacional. Se divide en 16 alcaldías, antes delegaciones políticas, mismas que se enlistan en la Tabla 2-2 especificando la población total en cada una hasta el año 2015 (INEGI, Encuesta Intersensal 2015, 2015).

<sup>1</sup> A lo largo de este trabajo se utilizarán los términos Ciudad de México (CDMX) y alcaldía, en lugar de Distrito federal (DF) y delegaciones políticas, respectivamente. Esto, en correspondencia con el Acuerdo General Del Pleno de la Judicatura Federal publicado en el Diario Oficial de la Federación el 05 de febrero del 2016.

Otras características importantes del territorio que conforma la Ciudad de México son:

- La población presente en 2015 fue de 8, 918 653 personas. De la cual el 99.5 % es población urbana y 0.05% es población rural, (INEGI, Encuesta Intersensal 2015 , 2015)
- Según la Secretaría de Economía, el Producto Interno Bruto (PIB) de la CDMX alcanzó el 16.8% en 2015, colocándose en el primer lugar de aportación con respecto al total nacional.
- Las principales actividades económicas y sus porcentajes respecto al total del PIB alcanzado en la CDMX se muestran en la Gráfica 2-1
- La Secretaria de Economía reportó que, para el cuarto trimestre de 2016, la Población Económicamente Activa (PEA) ascendió a 4, 350, 772 personas, que corresponde al 63 % de la población con edad de trabajar. El 95.7 % de la PEA<sup>2</sup> está ocupada y el resto, 4.3 %, desocupada.
- Asimismo, la Secretaría de Economía, acorde con el Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO), reportó el Índice de Competitividad Estatal (ICE<sup>3</sup>) para la CDMX, que mide la capacidad de un estado para elevar su competitividad, con el objetivo de atraer inversionistas y retener su talento. La CDMX obtuvo un ICE de 62.43 en 2014 y se colocó en la primera posición a nivel nacional, al igual que en 2012.



Gráfica 2-1 Porcentaje de aportación al PIB de las principales actividades económicas en CDMX.  
 Datos: Información Económica y Estatal por la Secretaría de Economía (Secretaría de Economía, 2017).  
 Fuente: Elaboración propia (2020)

<sup>2</sup> De acuerdo con el informe de la Secretaría de Economía, “la *población ocupada* se conforma de las personas de 15 o más años que durante el periodo de referencia realizaron o tuvieron una actividad económica y la *población desocupada* se conforma de las personas que buscaron activamente realizar una actividad económica en algún momento del mes anterior al día de la entrevista”.

<sup>3</sup> El ICE evalúa los aspectos de Derecho, Ambiente, Sociedad, Político, Gobiernos, Factores, Economía, Precusores, Relaciones e Innovación.

## 2.2 Modos de transporte en la CDMX

El transporte en la CDMX no se trata de un sistema constituido por un único modo de transporte, sino que está conformado por diversos sistemas que operan paralelamente con el objetivo de satisfacer las necesidades de movilidad de la población de la ciudad y regiones vecinas con quienes se tiene interacción, por ejemplo, el estado de México que rodea más de la mitad de contorno la ciudad.

En la CDMX existen el Sistema de Transporte Colectivo (STC) metro, el Sistema de Transporte Eléctrico (STE), la Red de Transporte Público (RTP), el Mexibús, el Metrobús, el Tren suburbano, además de los sistemas de servicio de taxi, ECOBICI, y diversos sistemas de transporte concesionado de baja capacidad que operan camiones, microbuses y combis.

Cada modo de transporte puede ser visto con un subsistema con características particulares referentes a la infraestructura disponible, el parque vehicular, rutas y conexiones con otros modos de transporte, así como las normas y leyes que existen en cada caso. En el ANEXO A: MODOS DE TRANSPORTE DE LA CDMX se encuentra una breve descripción de cada uno de los subsistemas antes mencionados.

### 2.2.1 Movilidad integrada en la CDMX

Con el objetivo de integrar y vincular los distintos sistemas de transporte en la CDMX, en 2019 surge el plan estratégico de movilidad de la Ciudad de México (Semovi\_b, 2019) cuyo objetivo general es:

“crear un sistema integrado de movilidad que aumente la accesibilidad para la población, la productividad de la ciudad optimice la eficiencia del transporte de mercancías, y simultáneamente combatir problemas de desigualdad social, seguridad y disminución de emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero”, (Semovi\_b, 2019).

En dicho plan cuenta con tres ejes estratégicos:

1. Integrar los distintos tipos de transporte de la ciudad.
2. Mejorar la infraestructura y servicios de transporte existentes.
3. Proteger a los usuarios a través de infraestructura y servicios incluyentes, dignos y seguros.

Respecto al eje 1 se establece la integración física, operacional, de pago y de imagen de los distintos sistemas de transporte de la ciudad con el objetivo de favorecer la intermodalidad y promover los viajes a pie, en bicicleta y en transporte público (Semovi\_b, 2019). Una de las estrategias principales que surge en 2019 es el comienzo de la integración a un sistema único de prepago y el mapa del sistema de Movilidad Integrada de la ciudad de México que contempla estaciones y rutas del Metro, Metrobús, Trolebús, RTP, Cablebús<sup>4</sup>, Tren suburbano y Mexibús. La tarjeta única de prepago integra además el pago de ECOBICI y bici-estacionamientos.

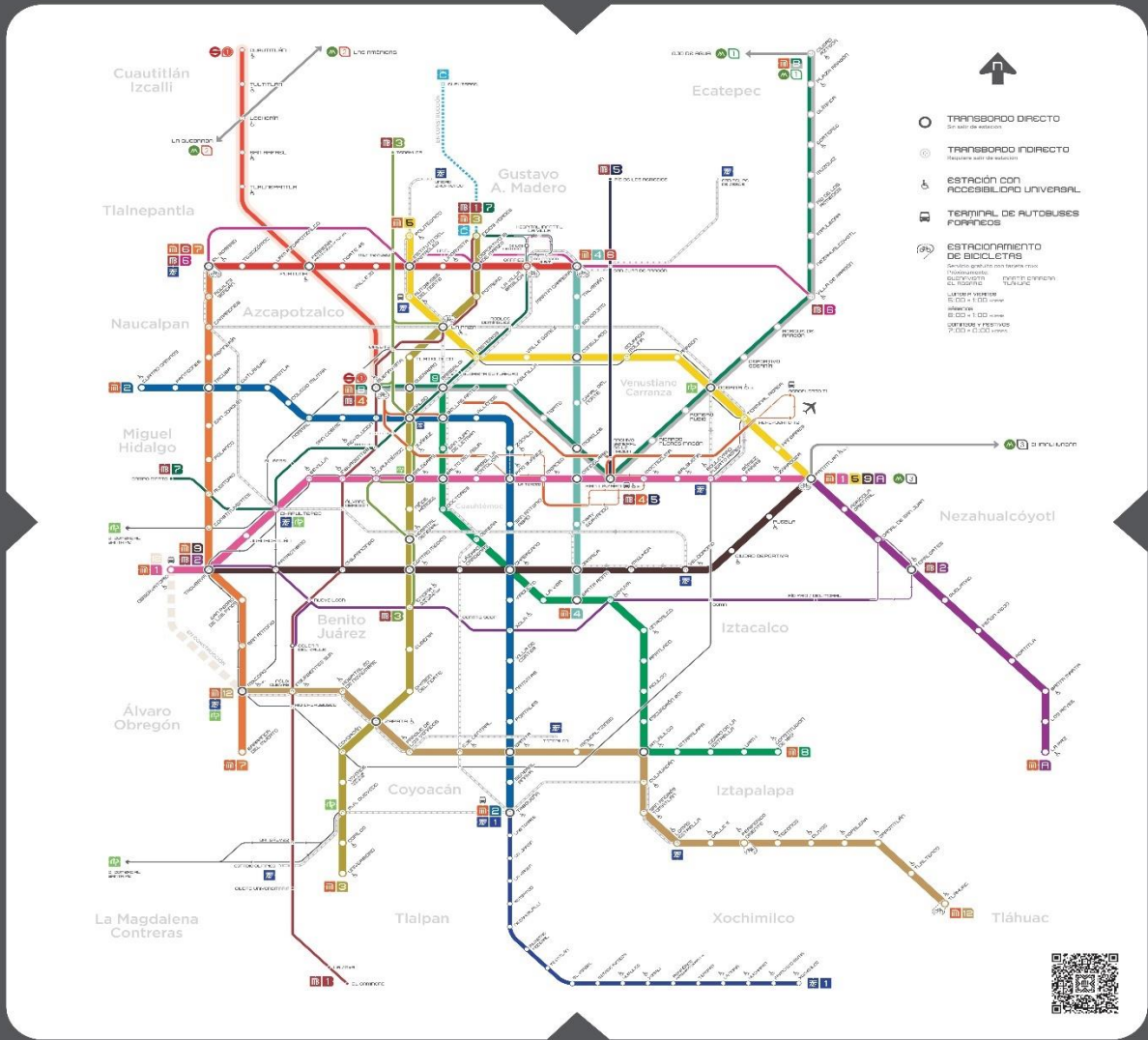
---

<sup>4</sup> Cablebús es un sistema de teleféricos que se encuentra actualmente en desarrollo en la CDMX. El plan estratégico de movilidad (Semovi\_b, 2019) propone el análisis, evaluación e implementación de 4 líneas en una primera fase que comenzó a finales del 2019 y se prevé su conclusión en 2022 (Redacción AN/ES, 2020)





# MOVILIDAD INTEGRADA DE LA CIUDAD DE MÉXICO UNA CIUDAD, UN SISTEMA



<p><b>METRO</b></p> <p>LÍNEA A VENTAS 8:00 - 0:00 horas GRATIS 9:00 - 0:00 horas DÓNDESE VENTAS 7:00 - 0:00 horas</p> <p>Consulta <a href="http://metro.cdmx.gob.mx">metro.cdmx.gob.mx</a> para más información. Los domingos y días festivos, la billete va en blanco.</p>	<p><b>METROBÚS</b></p> <p>LÍNEA A VENTAS 4:30 - 0:00 horas GRATIS 4:30 - 0:00 horas DÓNDESE VENTAS 5:00 - 0:00 horas</p> <p>Consulta <a href="http://metrobus.cdmx.gob.mx">metrobus.cdmx.gob.mx</a> para más información y horarios de las líneas de viaje al Metrobús.</p>	<p><b>TREN LIGERO</b></p> <p>LÍNEA A VENTAS 8:00 - 0:00 horas GRATIS 8:00 - 0:00 horas DÓNDESE VENTAS 7:00 - 0:00 horas</p> <p>Consulta <a href="http://tla.cdmx.gob.mx">tla.cdmx.gob.mx</a> para más información. Servicio <b>Rebajas</b> en algunos líneas de trolebús de 0:00 a 5:00 horas todos los días.</p>	<p><b>TROLEBÚS</b></p> <p>LÍNEA A VENTAS 8:00 - 0:00 horas GRATIS 8:00 - 0:00 horas DÓNDESE VENTAS 5:30 - 0:00 horas</p> <p>Consulta <a href="http://tla.cdmx.gob.mx">tla.cdmx.gob.mx</a> para más información. Servicio <b>Rebajas</b> en algunos líneas de trolebús de 0:00 a 5:00 horas todos los días.</p>	<p><b>RTP</b></p> <p>LÍNEA A VENTAS 8:30 - 1:00 horas GRATIS 8:30 - 1:00 horas DÓNDESE VENTAS 5:30 - 0:00 horas</p> <p>Consulta <a href="http://smt.cdmx.gob.mx">smt.cdmx.gob.mx</a> para más información. Servicio <b>Rebajas</b> en algunas líneas de 0:00 a 5:00 horas todos los días.</p>	<p><b>CABLEBÚS</b></p> <p>Las líneas de Cablebús en la Ciudad de México son gratuitas y operan de 0:00 a 5:00 horas.</p> <p>Consulta <a href="http://cablebus.cdmx.gob.mx">cablebus.cdmx.gob.mx</a> para más información.</p>	<p><b>TREN SUBTERRÁNEO</b></p> <p>LÍNEA A VENTAS 8:00 - 0:30 horas GRATIS 8:00 - 0:30 horas DÓNDESE VENTAS 7:30 - 0:30 horas</p> <p>Consulta <a href="http://tsubterranos.com">tsubterranos.com</a> para más información.</p>	<p><b>MEXIBÚS</b></p> <p>LÍNEA A VENTAS 4:00 - 1:00 horas GRATIS 4:00 - 1:00 horas DÓNDESE VENTAS 4:30 - 1:00 horas</p> <p>Consulta <a href="http://smtmexibus.cdmx.gob.mx">smtmexibus.cdmx.gob.mx</a> para más información.</p>
---	---	---	--	---	---	---	--

Figura 2-1 Mapa de Movilidad Integrada de la Ciudad de México  
Fuente: (México\_a, 2018)

## 2.3 Características de los viajes en CDMX

La Encuesta de Origen Destino (EOD), proporciona información sobre la movilidad cotidiana de la población en la Zona Metropolitana del Valle de México<sup>5</sup> (ZMVM). Se han realizado cuatro EOD en la ZMVM; en los años 1983, 1994 y 2007 y 2017. Esta última corresponde al periodo comprendido entre el 23 de enero al 3 de marzo del 2017 y fue realizada por el INEGI junto con expertos del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), bajo la solicitud de los gobiernos del Estado de México y la CDMX. (EOD, 2017)

De acuerdo con INEGI, el objetivo de la EOD es:

“obtener información que permita conocer la movilidad actual de los habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), respecto a sus características, motivos duración, medios de transporte y horario de desplazamientos, entre otros aspectos, de los viajes que realizan.”, (INEGI\_a, 2017)

Los resultados de la EOD proporcionan datos adecuados que apoyan el diseño de políticas públicas y proyectos que fomentan el desarrollo sustentable del transporte, como la planificación de infraestructura vial, la estructura urbana y el análisis entre características sociodemográficas y movilidad cotidiana (INEGI\_a, 2017).

### 2.3.1 Viajes en la ZMVM y en la CDMX

La EOD 2017 consideró la información de viajes de la población de 6 años y más, en ZMVM y no exclusivamente en la CDMX ya que, existe un gran número de personas que viajan del Estado de México a la CDMX (y viceversa) para acudir a sus empleos, escuelas y otros sitios de interés personal. Por esta razón es de interés analizar los resultados tanto de manera general en la ZMVM como de manera particular en la CDMX.

De la Figura 2-2 observamos gráficamente que 86.7 % de los viajes con origen en la CDMX tienen destino dentro de la ciudad y el 13.3% restante tienen destino en la zona del Estado de México y Tizayuca.

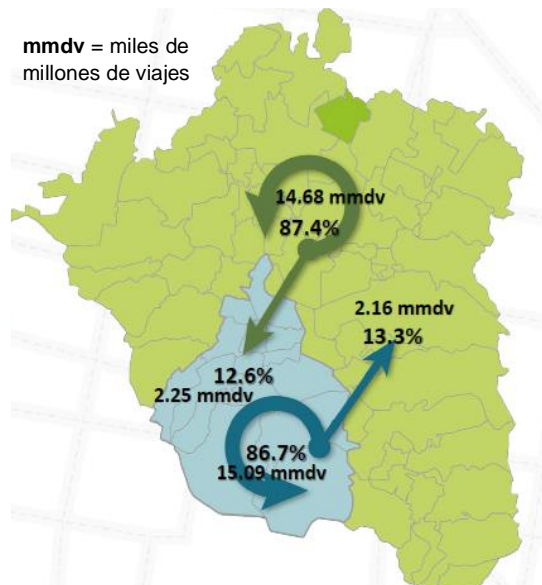


Figura 2-2 Viajes con origen en la CDMX y la CDMX.

Fuente: (EOD, 2017)

<sup>5</sup> La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) está constituida por 16 delegaciones de la Ciudad de México, 59 municipios conurbados del Estado de México y el municipio de Tizayuca del estado de Hidalgo (EOD, 2017)

De manera similar, el 87% de los viajes con origen en el Estado de México tienen destino dentro de la misma región y un 12% tienen destino en la CDMX.

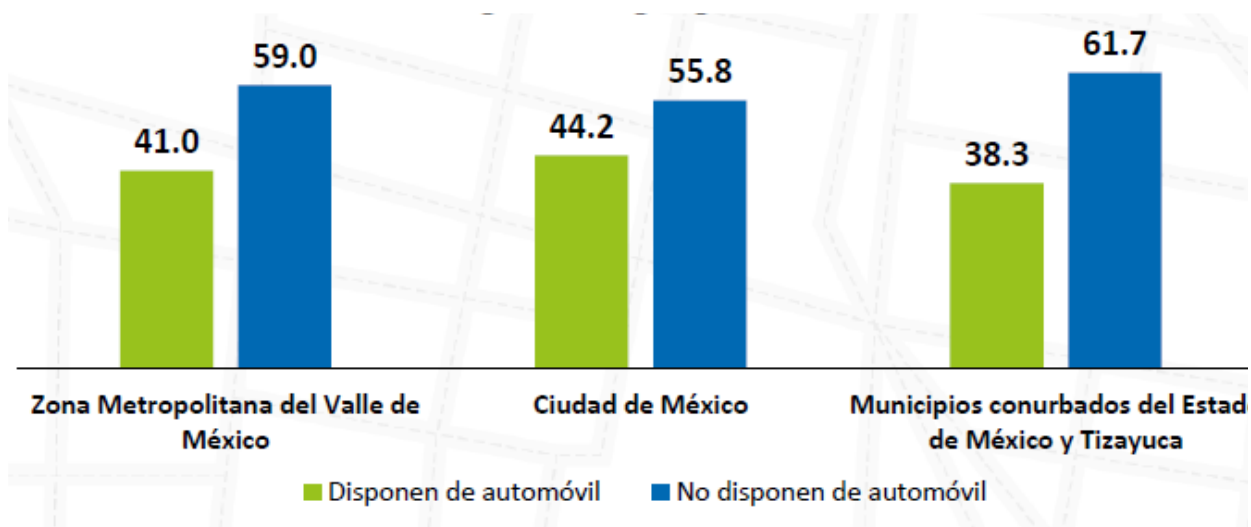
Para desempeñar tareas y labores cotidianas en un día entre semana, las personas que salen de sus hogares y tienen la necesidad de viajar, por lo general realizan más de un viaje al día. Los tres principales motivos de viaje para las personas en la ZMVM son:

- Asistir a la escuela (10.1%),
- Ir a un centro de trabajo (28.3%)
- Regresar a casa (47.0%).

El promedio de viajes al día para estas personas es de 2.2 y pueden involucrar más de un modo de transporte.

### 2.3.2 Recursos disponibles para la movilidad

Los recursos disponibles para la movilidad no son iguales para toda la población. En la CDMX, el 46.9% de los hogares no cuenta con ningún tipo de vehículo para realizar sus traslados, mientras tanto el 53.1% de los hogares cuentan con al menos un tipo de vehículo, ya sea automóvil, motocicleta o bicicleta. Estas proporciones son muy similares en el caso general de la ZMVM (46.8 y 53.2% respectivamente). Específicamente hablando de automóviles (auto o camioneta) la distribución porcentual de hogares se ilustra en la Gráfica 2-2. Donde observamos que, tanto en la CDMX como en el Estado de México, más de la mitad de los hogares disponen de un automóvil.



Gráfica 2-2 Distribución porcentual de hogares por disponibilidad de automóvil según área geográfica  
Fuente: (EOD, 2017)

Sin embargo, eso no significa que todos los miembros de dichos hogares utilicen exclusivamente el automóvil como el principal modo de transporte. En realidad, el 50.9% de las personas en la ZMVM utilizan al menos un modo de transporte público en sus recorridos, el 22% utiliza transporte privado y el 10.30% realiza parte del recorrido caminando.

Un poco más de la población de 6 años y más en la ZMVM realiza al menos un viaje entre semana. Esta proporción en la CDMX es del 84% y del 78% en municipios conurbados. Mientras tanto, en sábados el porcentaje de personas que realiza viajes disminuye a 58% de la población (de seis años y más) en la CDMX y a 53% en la ZMVM (EOD, 2017). Es importante hacer la separación en la presentación de resultados puesto que en sábado y domingo las actividades de la población son diferentes a las de días entre semana (lunes a viernes). Un ejemplo de esto es que la mayoría de las escuelas de educación básica desempeñan labores únicamente de lunes a viernes y muchas instituciones públicas y privadas establecen los días sábados y domingos como días de descanso.

En un día entre semana, en la ZMVM se realizan 34.56 millones viajes<sup>6</sup>, de los cuales 17.3 millones son en la CDMX. De la Tabla 2-3 observemos que, tanto en toda la ZMVM, como en la CDMX, la mayoría de los viajes utiliza el transporte público, seguido del modo exclusivamente caminando.

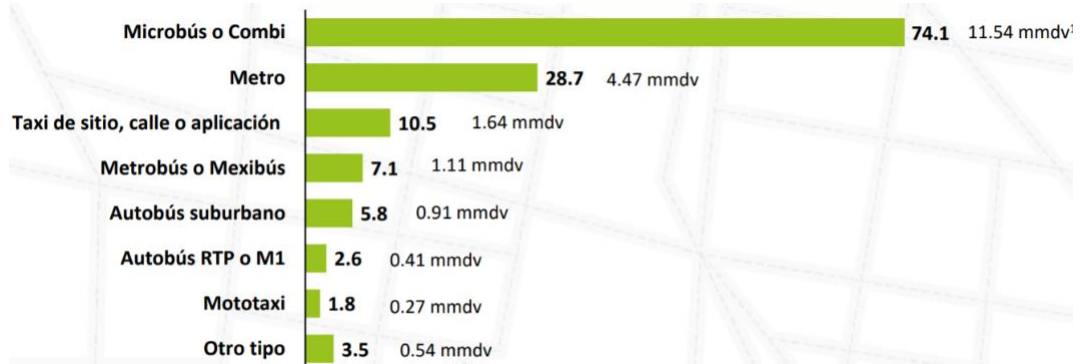
**Tabla 2-3 Características de los viajes en un día entre semana por modo de transporte en la ZMVM y en la CDMX**

<i>Modo de transporte</i>	<i>ZMVM</i>	<i>%</i>	<i>CDMX</i>	<i>%</i>
Total (Millones de viajes)	34.56		17.3	
<b>Transporte público</b>	15.57	44.78	8.62	49.43
Transporte privado	7.29	20.97	4.06	23.28
Bicicleta	0.72	02.07	0.24	01.38
<b>Exclusivamente caminando</b>	11.15	32.07	4.5	25.80
Otro modo de transporte	0.04	00.12	0.02	00.11

*Fuente: (EOD, 2017)*

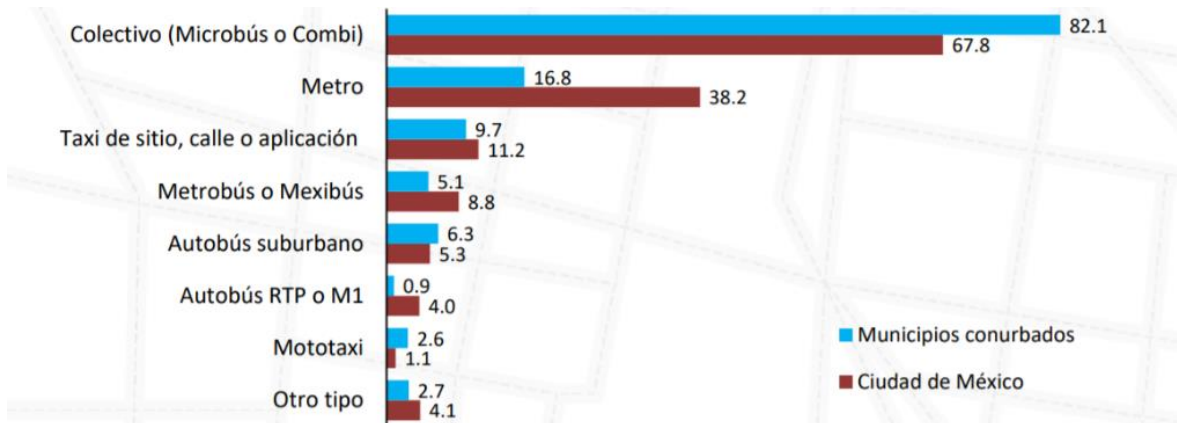
Para este trabajo es de interés analizar más a fondo las características de los viajes que se realizan en transporte público, particularmente viajes en microbús y Metrobús. De la Gráfica 2-3 se puede apreciar que la mayoría de los viajes en la ZMVM se realizan utilizando microbús o combi con un 74.1 % del total, mientras que solo el 7.1% de los viajes se realizan en Metrobús o Mexibús. Respecto a los viajes con origen en la CDMX (Gráfica 2-3), 67.8% se realizan en microbús o combi y 8.8% en Metrobús o Mexibús.

<sup>6</sup> Los viajes incluyen aquellos que se realizaron exclusivamente caminando con una duración mayor a 10 minutos.



Gráfica 2-3 Distribución porcentual de viajes realizados en un día entre semana en la ZMVM en transporte público, según principales modos de transporte utilizado.

Fuente: (EOD, 2017)



Gráfica 2-4 Distribución porcentual de viajes realizados en un día entre semana por la población de 6 años y más en transporte público, según principales medios de transporte utilizado y área geográfica de origen de viaje.

Fuente: (EOD, 2017)

Por otro lado, en un día entre semana, en ZMVM se realizan 6.6 millones de viajes en automóvil, en los cuales el número promedio de ocupantes es de 1.5, cuando la capacidad es generalmente para 4 personas, es decir, los viajes en automóvil generalmente utilizan tan solo el 37.5% de su capacidad (EOD, 2017). Los resultados de la EOD (2017) indican que el 68% de los viajes en automóvil (o camioneta) inician transportando únicamente a una persona al inicio del viaje y solo el 2.9% transporta a 4 personas o más. Sin duda este fenómeno repercute en el congestionamiento vehicular ya que se trata de una gran cantidad de vehículos transitando en la ciudad, y peor aún, cuando estos no son utilizados a su máxima capacidad.

### 2.3.3 Propósito de los viajes y hora de inicio

El propósito de los viajes en la ZMVM es distinto a pesar de tener como destino el mismo lugar. Por ejemplo, del total de viajes realizados hacia una escuela, el 62% tienen como propósito asistir a clases mientras que el propósito del 30.5 % es llevar o recoger a alguien en las instalaciones de la escuela. En la Tabla 2-4 se presentan tres de los principales destinos de viajes realizados en la ZMVM en un día entre semana y los dos principales motivos en cada caso.

**Tabla 2-4 Distribución porcentual de viajes realizados entre semana por lugar de destino, según el propósito del viaje principal y secundario.**

Destino del viaje	Propósito de viaje			
	Primario	%	Secundario	%
Escuela	Ir a estudiar	62.0	Llevar o recoger a alguien	30.5
Oficina	Ir al trabajo	93.9	Hacer tramites	3.7
Comercio, mercado, tienda o centro comercial	Ir de compras (bienes y servicios)	52.6	Ir al trabajo	42.1

Fuente: (EOD, 2017)

El propósito de los viajes se encuentra altamente relacionado con el horario en que se realizan y las reglas operativas que existen en el lugar destino. Por ejemplo, una regla de operación en las escuelas de educación básica establece la hora de entrada, la cual es fija y, por lo tanto, la población que viaja con destino a la escuela y cuyo propósito es tomar clases o trabajar dentro de las instalaciones, realizara su viaje en un horario específico definido por los horarios establecidos de la escuela, en este caso, el horario de entrada.

Los tres horarios en los que se inicia el mayor número de viajes en un día entre semana son:

- Por la mañana de 07:00 a 07:14 a.m.
- Por la mañana de 08:00 a 08:14 a.m.
- Por la tarde de 06:00 a 06:14 p.m.

Destacando que la hora de máxima demanda es de 07:00 a 07:59 a.m.

### 3 Elementos teóricos de sistemas y simulación

En la primera sección de este capítulo se presentan los aspectos teóricos referentes al enfoque sistémico, perspectiva principal desde la cual se desarrolla este trabajo. Posteriormente, en la segunda sección se discuten los elementos teóricos referentes a la simulación, incluyendo la metodología para la construcción y análisis de resultados de los modelos.

#### 3.1 El enfoque sistémico como herramienta para abordar problemas

El concepto de sistema es fundamental para abordar problemas al ser una herramienta que ayuda a entender la realidad de forma ordenada. Al trabajar con sistemas es necesario conocer sus elementos y entender la manera en que interactúan entre sí. De acuerdo con Russell L. Ackoff (1994), los sistemas son una unidad que consta de dos o más partes y cumplen las siguientes tres características:

1. Cada parte afecta el desempeño y propiedades de la unidad que conforman
2. Ninguna del parte puede tener efectos independientes del todo
3. Ningún subgrupo de elementos debe tener efectos independientes de la unidad

Bajo esta consideración un sistema es una unidad que no puede ser dividida en partes o subgrupos independientes y por lo tanto el sistema no puede ser analizado elemento por elemento de manera independiente, ya que existen comportamientos que emergen únicamente a través de la interacción de sus elementos.

El enfoque sistémico se ha utilizado desde siglos atrás, sin embargo, hoy en día este enfoque ha evolucionado e incorporado cosas nuevas, por lo que ha adquirido gran popularidad, tanto en la comunidad científica como en la industria. En México, el enfoque sistémico se hace presente a partir de la segunda mitad del XX, en un principio, en Universidades como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto Nacional (INP), así como en algunas otras instituciones educativas a nivel Superior. Posteriormente, gracias a los estudios adquiridos en las instituciones académicas, el enfoque sistémico comenzó a extenderse en algunas áreas del sector público al tener la oportunidad de contar con personal capacitado que motivara e implementara el conocimiento (Monroy & Jimenez, 2008) .

Para comprender este enfoque debemos tener en mente que un sistema no se define únicamente por un conjunto de elementos, sino que de manera inherente se refiere a la interacción que existe entre dichos elementos y como en conjunto impactan nuevamente a cada elemento individual, a la unidad que conforman y los objetivos que comparten.

Para Bertalanffy (1976), el enfoque de sistemas nace como necesidad, ya que el esquema mecanicista de vías causales aislables y el tratamiento marista resultaban insuficientes para enfrentarse a problemas teóricos, especialmente en las ciencias biosociales y a los problemas prácticos planteados por la tecnología moderna. La necesidad de herramientas teóricas para enfrenar este tipo de problemas volvió progresivamente realizable este enfoque.

El enfoque sistémico consiste en estudiar los sistemas como un conjunto de entidades que interactúan, más que como conglomerados de partes independientes que aíslan fenómenos en contextos confinados, ya que

existen propiedades de los sistemas que emergen y solo pueden tratarse adecuadamente desde un punto de vista holístico (Ackoff, Systems thinking and thinking systems, 1994)

El estudio de los sistemas por diferentes autores conlleva a la proliferación de conceptos y términos diferentes que como ideas nuevas necesitaron de tiempo para ser aceptadas. En particular, el concepto de sistema toma diferentes significados para cada persona, dependiendo del contexto en el que se desarrolle. Russell Ackoff tuvo la convicción de que la proliferación de nuevos términos convergerá en un conjunto unificado de términos generales aceptados como elementos del paradigma del enfoque sistémico. La Tabla 3-1 presenta una serie de definiciones de los términos más comunes dentro de este paradigma.

**Tabla 3-1 Términos generales del paradigma del enfoque sistémico.**

<b>Sistema:</b>	Conjunto de al menos dos elementos interrelacionados. Cada elemento del sistema está relacionado con otro elemento de manera directa o indirecta y ningún subconjunto de elementos es independiente del todo.
<b>Sistema Abstracto</b>	Un sistema del cual todos los elementos son conceptos como puede ser un sistema filosófico o de lenguaje.
<b>Sistema concreto</b>	Un sistema del cual al menos dos componentes son objetos.
<b>Estado de un sistema</b>	Las propiedades relevantes de un sistema en un momento dado. Las propiedades relevantes son las propiedades significativas según el estudio a realizar.
<b>Entorno de un sistema</b>	Conjunto de elementos y sus propiedades relevantes que no son parte del sistema pero que un cambio en cualquiera de ellos puede producir un cambio en el estado del sistema. Los elementos externos que afectan propiedades irrelevantes del sistema no son considerados parte de su entorno.
<b>Estado del entorno de un sistema</b>	Conjunto de propiedades relevantes del entorno de un sistema en un momento dado.
<b>Sistema cerrado</b>	Sistema que no tiene entorno, es decir, no es afectado por situaciones externas.
<b>Evento de un sistema/entorno</b>	Cambio en una o más propiedades estructurales del sistema/entorno en un periodo de tiempo y con una duración específica.
<b>Sistema estático</b>	Sistema en el cual no ocurren eventos.
<b>Sistema dinámico</b>	Sistema en el que ocurren eventos y cuyo estado cambia con el tiempo.
<b>Sistema Homeostático</b>	Sistema estático cuyos elementos y entorno son dinámicos. Por lo tanto, un sistema que mantiene su estado en un entorno cambiante por medio de ajustes internos.

Fuente: (Ackoff, Towards a system of system concepts, 1971)

Frecuentemente, los sistemas no permanecen estáticos, sino que tienen a cambiar presentando diferentes comportamientos, reacciones y respuestas a eventos determinados. Algunos sistemas tienen las habilidades de adaptación y aprendizaje, que les permite reaccionar de manera favorable o desfavorable a



eventos que los acercan o alejan de sus metas y objetivos. La reacción de un sistema se presenta como un conjunto de ajustes internos o externos, a partir de los cuales le es posible aprender, cuando el sistema tiene memoria.

Por otro lado, está el concepto de problema, que se define como la discrepancia existente entre un estado actual y un estado deseado de las cosas en un punto determinado en el tiempo. Gordon Chen (1975) define la siguiente manera:

$$P_t = |D_t - A_t| \quad (1)$$

Donde

$P_t$ =Problema al tiempo  $t$

$D_t$ =Estado deseado de las cosas en el tiempo  $t$

$A_t$ =Estado actual de las cosas al tiempo  $t$

$t$  = Un punto en el tiempo

Con base en la definición anterior, se puede decir que existe un problema siempre que  $P_t > 0$ , lo cual ocurre si y solo si, sucede una de las siguientes condiciones:

- I. Es estado actual no cambia, pero el estado deseado sí.
- II. El estado deseado permanece igual pero el estado actual ha cambiado.
- III. El estado actual y el estado deseado cambian, pero no coinciden.

Un aspecto fundamental para definir correctamente un problema es definir claramente cuál es el estado deseado y asegurarse de que este sea un estado factible. También es importante conocer las condiciones actuales que conforman el estado actual de las cosas, así como las restricciones que impiden pasar del estado actual al deseado, una estrategia que facilita esta tarea es definir también el estado no deseado, el cual será una guía para identificar en qué momento nos estamos dirigiendo en la dirección opuesta. Lo anterior es indispensable para dar solución a problemas, ya que el modo y la eficacia en la resolución de problemas depende completamente en cómo está definido.

Con estas ideas en mente, el enfoque sistémico puede ser definido como una metodología para resolver problemas (Chen, 1975), es decir, una manera de percibir y pensar un problema, identificando y enfocándose en los elementos que lo conforman como un sistema. Cuatro pasos importantes pueden ser considerados en la metodología del enfoque sistémico:

- 1) Definir el estado actual del sistema
- 2) Definir el estado deseado del sistema
- 3) Identificar las restricciones que impiden alcanzar el estado deseado
- 4) Definir indicadores que permitan observar y medir distintos aspectos que difieren entre el estado actual y deseado del sistema.

Existen muchas herramientas teóricas y otras metodologías que apoyan a la resolución de problemas, sin embargo, los cuatro pasos anteriores son las directrices de una metodología global que puede aplicarse independientemente de las técnicas (y otras metodologías) utilizadas a lo largo del proceso de solución del problema.

## 3.2 Conceptos de simulación

### 3.2.1 Modelos de simulación

Generalmente al hablar de “simulación” nos referimos a un proceso, pero es muy importante considerar que tal proceso se lleva a cabo sobre un modelo. Un modelo es una entidad que se utiliza para representar un fenómeno o situación del mundo real, implica simplificaciones que permiten un mejor análisis de la situación real alcanzando un nivel de detalle adecuado para satisfacer los objetivos de estudios específicos (White & Ingalls, 2017). Además de analizar la situación actual, con un modelo es posible realizar predicciones y formular estrategias de control (Rubinstein & Kroese, 2017)

Un modelo debe tener un equilibrio entre dos características conflictivas: realismo y simplicidad. Por un lado, un modelo debe ser realista y permitir una verdadera aproximación de la realidad, incorporando sus aspectos más importantes. Por otro lado, y en oposición a lo anterior, los modelos deben lo más simples posibles con el objeto de facilitar su comprensión y manipulación (Rubinstein & Kroese, 2017)

El concepto *simular* tiene como sinónimos: *imitar, representar, copiar, fingir o actuar*, que nos proyectan una simple definición de su significado. Notemos que, bajo esta definición simple y genérica, podemos tomar una pintura, o una fotografía como la simulación de un paisaje o una persona, respectivamente, ya que se trata de dos representaciones (de diferente tipo). En la ciencia, industria y educación la simulación es una técnica de investigación y enseñanza, un enfoque particular para estudiar modelos.

Existen dos tipos de modelos en simulación: los estáticos y los dinámicos (Law A. M., 2015). Los estáticos son representaciones de un sistema en un tiempo fijo en particular (como una pintura, una fotografía o los modelos Monte Carlo) y los dinámicos son aquellos en los que el transcurso del tiempo tiene un papel muy importante (como la actividad operacional en una fábrica en un determinado periodo de tiempo).

Aunque comúnmente los modelos tienen como punto de partida una situación, fenómeno o sistema del mundo real, existen modelos que carecen de tal referencia, cuando se trata de modelos referentes a nuevas propuestas o sistemas que aún no existen. Los modelos de simulación son entonces representaciones abstractas del mundo real o de situaciones hipotéticas que se representan mediante una serie de acciones que conforman un proceso.

Para hacer tal representación se necesita tener ideas claras de la situación que se quiere representar y para qué se requiere tal representación, es decir, se deben tener en claro los objetivos. Además, se requiere conocer cuáles son los elementos involucrados y como es que se relacionan (enfoque sistémico). También es indispensable establecer una serie de reglas, relaciones y procedimientos operativos que definirán el comportamiento de los elementos dentro del sistema.

Los modelos de simulación ofrecen una alta flexibilidad en la representación de cualquier sistema y permiten proporcionar soluciones o mejorar situaciones del mundo real donde formulaciones de modelos matemáticos, con expresiones analíticas complejas no han proporcionado soluciones debido a la complejidad para resolverlas y que en ocasiones las soluciones puntuales son imposibles de obtener (Rubinstein & Kroese, 2017). También son utilizados como una herramienta a la investigación en situaciones donde es imposible, prohibido o poco factible hacer cambios o modificaciones que involucran altos costos, procesos de larga duración, inseguros o incluso ilegales. (White & Ingalls, 2017). Aunque el proceso de

simulación no siempre otorga soluciones exactas, comúnmente genera soluciones que permiten solucionar o mejorar una situación problemática actual.

Por medio de los modelos de simulación es posible realizar acciones fácilmente: como construir, destruir y modificar elementos en cualquier sistema, sin ocasionar daños, gastos o alteraciones a los elementos del mundo real, pues los modelos representan un entorno sin ningún tipo de riesgos producidos por errores y malas decisiones (Grigoryev, 2015). La Figura 3-1 ilustra de manera muy clara el uso de la simulación para tratar problemas del mundo real a través de un modelo.



Figura 3-1 Modelos de simulación para tratar problemas del mundo real.  
Fuente: (Grigoryev, 2015)

Robinson (2014) presenta la siguiente definición para el concepto de simulación.

“Experimentación con una imitación simplificada (en una computadora) de las operaciones de un sistema a través del tiempo, con el objetivo de mejorar el entendimiento y/o mejorar tal sistema”

Notemos que, en la definición anterior, Robinson (2014), hace referencia a la simulación computacional, esto se debe a que, generalmente los modelos de simulación utilizan herramientas computacionales, para realizar cálculos matemáticos, gráficos o animaciones. Sin embargo, no todos los modelos de simulación requieren de herramientas computacionales, por ejemplo, maquetas a escala o habitaciones con ambientes simulados, cuyo objetivo es entrenar al personal de diferentes áreas sin exponerlos a fallas del sistema real, como lo mencionan (White & Ingalls, 2017). A partir de ahora, aunque la definición de muchos términos se presenta de manera genérica, los conceptos se enfocan en describir modelos de simulación computacional y no a modelos de simulación físicos.

El proceso de simulación parte de un modelo, ya sea físico o computacional y puede considerarse en dos fases:

- Fase I: Imitar el comportamiento de interés que permitan hacer observaciones que apoyen al entendimiento de la situación real y a partir de dicho análisis, crear conclusiones que describan el comportamiento actual de la situación simulada.
- Fase II: Luego de comprender el comportamiento actual del sistema, es posible evaluar y comparar alternativas generadas a partir de la modificación de ciertos parámetros, lo que se conoce como experimentación. En esta fase es indispensable explicar y sustentar los resultados de la simulación que sirven como herramienta y apoyan la toma de decisiones.

En muchas aplicaciones de la simulación, los investigadores se enfocan únicamente en la primera fase cuando sus objetivos son principalmente comprender y observar el comportamiento del sistema simulado, sin aplicar ningún cambio en los parámetros de entrada ni a la estructura lógica de funcionamiento. En la segunda fase, el objetivo es comprender como cambia el comportamiento del sistema, al analizar los datos de salida una vez que se han realizado variaciones en los parámetros de entrada.

Notemos que todas las observaciones y modificaciones en el proceso de simulación se realizan sobre el modelo y no sobre la situación real, lo que asegura que cualquier consecuencia negativa provocada por errores de planeación o ejecución en la modificación de parámetros, no tendrá impacto en la situación del mundo real. Esta, es quizá, la característica más valiosa de la simulación.

La simulación tiene una amplia área de aplicación. Por ejemplo: procesos de emergencia simulados (evacuación, incendios, inundaciones), modelos de inventarios, comportamiento humano, comportamiento económico, movimiento de vehículos, dinámica de cruceros viales, diseño de prototipos y su funcionamiento (barcos, aviones, piezas, herramientas, etc.) y ambientes simulados de (vuelo, plantas nucleares) que sirven como herramienta para la capacitación y certificación de personal.

### ***3.2.1.1 Clasificación de los modelos de simulación***

Los modelos de simulación pueden clasificarse de distintas maneras, por ejemplo, por el tipo de aplicación, la estrategia de implementación o el tipo de sistemas que representan. En este último, existen principalmente dos tipos de sistemas: discretos y continuos.

Los sistemas de eventos discretos son aquellos en los que las variables de estado cambian instantáneamente a través de saltos, en puntos discretos en el tiempo (Rubinstein & Kroese, 2017) Por ejemplo, el movimiento de los clientes dentro de un banco que pasan de estar en una línea de espera a un estado de estar siendo atendidos. Mientras tanto, en los sistemas continuos las variables de estado cambian constantemente con respecto al tiempo (Rubinstein & Kroese, 2017) por ejemplo, el movimiento de una partícula en el aire.

Robinson (2014) categoriza la simulación de acuerdo con el método de implementación (Tabla 3-2).

Tabla 3-2 Clasificación de los modelos de simulación según método de implementación.

<i>Simulación de eventos discretos</i>
En la simulación de eventos discretos las entidades cambian de un estado o actividad a otra en un momento específico y bien definido. Cuando las entidades llegan una actividad del sistema donde los arribos tienen mayor rango de llegada que de procesamiento, se generan líneas de espera. El objetivo principal es modelar y rastrear de manera detallada el movimiento de las entidades (personas, objetos o información) dentro del sistema.
<i>Simulación Monte Carlo</i>
Es un método utilizado para la resolución de problemas, a través de la generación de variables aleatorias que interactúan entre sí para generar resultados que apoyen el análisis y predicción del comportamiento de las variables de interés. Es frecuentemente utilizada para simular un resultado en algún punto futuro o en una serie de periodos (días, semanas, meses, años). Es utilizado en la simulación de ambientes complejos como servicios financieros e industria farmacéutica
<i>Simulación de sistemas dinámicos</i>
Utiliza un enfoque continuo a través del tiempo. A diferencia de la simulación de eventos discretos, en donde se habla del movimiento de entidades a través del sistema, se refiere al movimiento de flujos (objetos, personas, dinero, vehículos) que integran y desintegran simultáneamente los bloques que conforman el sistema. Los bloques cambian de tamaño continuamente en respuesta al balance del flujo que entra y sale de ellos.
<i>Simulación basada en agentes</i>
Este método pretende modelar la interacción de un conjunto de agentes (entidades) con comportamiento individuales, a través del tiempo. La modelación y simulación basada en agentes es considerada una categoría de modelos computacionales que involucran acciones dinámicas, reacciones y protocolos de intercomunicación entre los agentes, dentro de un ambiente compartido (Sameera, Georgios, Pierre, & Gregory, 2017), a partir de los cuales emergen comportamientos comunitarios. Es ampliamente utilizado en biología, física y sistemas sociales.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Robinson S. a., 2014)

Por otro lado, Rubinstein y Kroese (2017), presentan tres clasificaciones relacionadas a las características propias del sistema modelado (Tabla 3-3).

Tabla 3-3 Clasificación de los modelos de simulación según características del sistema simulado.

<b>Clasificación 1</b>	<i>Modelos estáticos</i>	<i>Modelos Dinámicos</i>
	No evolucionan al paso del tiempo	Evolucionan a través del tiempo
<b>Clasificación 2</b>	<i>Modelos determinísticos</i>	<i>Modelos Estocásticos</i>
	En los cuales todos sus componentes (variables, lógicas y relaciones) son bien definidos, es decir, no son aleatorios y no están sujetos a incertidumbre.	Modelos en los que al menos un componente está sujeto a la incertidumbre y aleatoriedad.
<b>Clasificación 3</b>	<i>Modelos discretos</i>	<i>Modelos Continuos</i>
	Donde las variables de estado cambian instantáneamente en puntos discretos sobre el tiempo.	Los cambios de estado suceden de manera continua al paso del tiempo.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Rubinstein & Kroese, 2017)

Existen demasiadas situaciones en las que los sistemas dinámicos podrían ser utilizados en lugar de la simulación de eventos discretos, o viceversa (Robinson S. a., 2014) y es quizá esta la razón por la que surge la simulación híbrida, definida como el enfoque de modelación que combina dos o más métodos (eventos discretos, sistemas dinámicos y simulación basada en agentes, (Brailsford, Eldabi, Kunc, Mustafee, & Osorio, 2019).

### 3.2.1.2 Terminología en modelos de simulación

Independientemente del método de implementación o las características del sistema simulado, es indispensable identificar y familiarizarse con algunos conceptos básicos utilizados de manera genérica en los procesos de modelado y simulación. A continuación, se presenta una breve lista de conceptos, extraída de (White & Ingalls, 2017), que, a pesar de ser definidos desde un enfoque de simulación de eventos discretos, proporciona la noción adecuada para un estudio de simulación universal.

- **Estados:** Un estado puede considerarse como un conjunto de condiciones que se cumplen simultáneamente dentro del sistema. Cada una de estas condiciones se define por el valor de una **variable de estado**.
- **Entidades /Flujo:** Son los elementos que definen los eventos dentro del sistema simulado. Las entidades son quizá el elemento más importante y básico de una simulación, ya que su movimiento a través del sistema modifica las variables de estado (del sistema). El término entidades, es generalmente utilizado en la simulación de eventos discretos, y es el análogo a los agentes en la simulación basada en agentes. Cuando se habla de simulación de sistemas complejos o simulación de sistemas dinámicos, no se habla de entidades, sino de flujo a través del sistema.
- **Atributos:** Es el conjunto de características que tienen las entidades, agentes o flujo
- **Parámetros o Entradas:** Información que el modelo requiere para procesar y ser capaz de proporcionar un resultado como información de salida.
- **Datos de salidas o resultados:** Es información (cuantitativa o cualitativa) que se obtiene a través del modelo de simulación y a partir de las entradas.
- **Actividades:** Son procesos y mecanismos de la simulación que definen cómo y cuándo las entidades deben moverse a través del sistema. Tres tipos de actividades son:
  - **Retraso:** El movimiento de entidades y flujos son suspendidos por un periodo de tiempo bien definido.
  - **Cola:** El movimiento de entidades y flujos son suspendidos por un periodo de tiempo no especificado.
  - **Lógicas:** Permite que las entidades modifiquen los estados del sistema a través de variables de estado o lógicas de decisión.
- **Eventos:** Son condiciones que ocurren en un momento determinado y causan cambios en los estados del sistema. Las entidades interactúan con las actividades creando eventos que modifican los estados del sistema.
- **Recursos:** Es cualquier elemento, entidad u objeto con restricciones de capacidad o disponibilidad para la ejecución de actividades. Ejemplos de recursos son: maquinas, herramientas, trabajadores, nodos de redes de comunicación, calles e intersecciones.

- **Variables Globales:** Son variables definidas para almacenar información relevante del sistema, con la cual, mediante un proceso interpretativo, apoya el entendimiento del sistema simulado y el de sus componentes.
- **Recolectores de estadísticas:** Como el concepto lo indica, su objetivo es recolectar información de los elementos que conforman el modelo de simulación, ya sean entidades, eventos, actividades, recursos o estados. Existen tres tipos de recolectores de estadísticas:
  - **Contadores:** Contabilizan el número de procesos finalizados o unidades que cumplieron ciertos criterios. Ejemplo: el número de unidades fabricadas con defectos.
  - **De tiempo constante:** Recolectan estadísticas del valor de tiempo gastado por diferentes variables de la simulación. Ejemplo: el tiempo que un operador se mantiene ocupado a lo largo de un día laboral.
  - **De cantidad total:** Contabiliza una información a la vez, sin importar el inicio, fin o la cantidad de tiempo entre observaciones. Ejemplo: la duración de una llamada telefónica (sin importar el inicio o fin de otras llamadas)
- **Reloj:** es una variable global que indica el tiempo actual en la simulación.
- **Replica o iteración:** Consiste en una ejecución completa del modelo de simulación.
- **Condición de paro:** Es un evento que determina la longitud de cada iteración o réplica y da origen a la terminación de la simulación. La condición de paro puede especificarse de manera fija o como resultado a un parámetro de entrada.

### 3.2.2 Actividades en el desarrollo de un estudio de simulación

Las actividades para el desarrollo de un modelo de simulación van más allá de la elaboración del modelo. Existen diversas metodologías enfocadas a la simulación, que varían de acuerdo con la técnica de implementación utilizada o a las características propias del sistema involucrado. Sin embargo, existen siete actividades/aspectos indispensables en el desarrollo de un estudio de simulación que, sin duda, deben ser consideradas. A continuación, se presenta una breve descripción de cada una de ellas.

#### 3.2.2.1 Propósito de la simulación

Definir el propósito de realizar un modelo de simulación es un elemento muy importante que sirve como una directriz a lo largo del proceso. Antes de comenzar a modelar es necesario tener en claro ¿por qué es necesario un modelo de simulación? y ¿qué se obtendrá del modelo?, la respuesta adecuada a este tipo de preguntas nos permite visualizar el camino que se debe seguir, cuáles herramientas y metodologías utilizar.

#### 3.2.2.2 Recolección de datos de entrada

Previo a la estructuración del modelo es de suma importancia tener suficiente conocimiento del sistema en cuestión, conocer sus elementos, la manera en que operan y las interrelaciones que existen, no solo en términos cuantitativos sino también cualitativos. Para conocer el sistema en los dos aspectos los

investigadores deben tener un acercamiento al sistema, ya sea incorporándose al sistema ocasionalmente o a través de observaciones (sin formar parte de él). Para recolectar información existen diversas técnicas como son: entrevistas a los miembros del sistema (cuando está conformado por personas), observaciones, videograbaciones, audio grabaciones, encuestas, toma de tiempos, experimentación, consulta a expertos y una extensa revisión de la literatura correspondiente a estudios previos del mismo sistema en cuestión, o bien, a estudios referentes a sistemas similares. Hernández et al. (2010) proporcionan una descripción detallada de las técnicas e instrumentos utilizados para la recolección de datos, en los capítulos 9 y 14 de su obra “*Metodología de la investigación*”.

Es importante contar con un plan estratégico para la recolección de datos y tener en mente cuestiones tales como: ¿Qué datos necesito?, ¿Para qué los necesito?, ¿Qué métodos utilizaré para recolectar información?, ¿Aproximadamente, cuánto tiempo me tomará recolectar datos?, ¿Cuáles recursos se encuentran disponibles? También es requisito indispensable contar con instrumentos de medición confiables, de lo contrario la información obtenida será deficiente y en tal caso, la investigación relacionada no es digna de tomarse en cuenta (Sampieri, Fernández, & Bautista, 2010).

Para describir el sistema se requiere de información de calidad que de verdad represente el sistema que se va a modelar. En este sentido, se debe asegurar que la información obtenida sea suficientemente representativa del sistema. Por lo general, no es suficiente una única observación, entrevista o documento, sino que se requieren muestras de más de un elemento para obtener información confiable y representativa. Ya que, en la toma de un solo dato, existe la posibilidad de error, incertidumbre u opiniones subjetivas (cuando se trata de entrevistas).

Entonces, se requiere de un plan estratégico que nos permita obtener suficiente información representativa sin extender demasiado el periodo de recolección de datos, ya que esto requiere de esfuerzo y recursos.

### **3.2.2.3 Análisis de los datos**

Una vez que se conoce el sistema lo suficiente y que se han recolectado datos se requiere realizar una limpieza y estructuración de estos, de tal manera que la información obtenida en la etapa de recolección sea lo suficientemente clara, sencilla y ordenada para poder incorporarla al modelo.

Al tratarse de información cuantitativa frecuentemente se habla de parámetros estocásticos, con un grado de incertidumbre. Los dos mejores métodos para modelar una fuente de aleatoriedad son: el ajuste de datos a distribuciones de probabilidad y el uso de distribuciones empíricas (Law A. M., 2016). Para sugerir una distribución de probabilidad apropiada se puede considerar lo siguiente:

1. Conocer las características particulares de cada distribución y relacionarlo con el comportamiento particular de los datos que el fenómeno analizado puede presentar. Por ejemplo, conocer si los datos toman valores booleanos o múltiples valores reales o enteros, positivos o negativos, y así determinar si se trata de distribuciones continuas o discretas.
2. Conocer la medida en que un conjunto de datos experimentales es representado por una función de distribución. La herramienta grafica más simple y utilizada es el histograma de los datos que, a partir de las frecuencias observadas nos permite visualizar aspectos como la simetría.



3. Así mismo se puede utilizar la información histórica y teórica de las distribuciones que se han utilizado previamente en áreas afines.

Una vez identificadas las posibles distribuciones de probabilidad a la que pertenecen los datos se requiere estimar los parámetros correspondientes y realizar pruebas de bondad de ajuste con el objetivo de definir si los datos provienen de dicha distribución (Moreno & Nieves, 2019).

En esta etapa de la simulación existen dos errores muy comunes: 1) representar la información utilizando la media como reemplazo de una distribución y 2) utilizar la distribución errónea. (Law A. M., 2016) El primero, puede producir resultados erróneos e inadecuados en la investigación y la principal razón es que un parámetro de naturaleza estocástica se simplifica y define como un parámetro determinístico que no está sujeto a la incertidumbre con la que se debe considerar. En el segundo error, se considera aleatoriedad en el valor del parámetro, pero además de solo considerarlo es muy importante definir un comportamiento de tal aleatoriedad, y para ello es importante definir la distribución adecuada. Una de las distribuciones más utilizadas es la normal, incluso cuando se sabe que es poco apropiada para el modelo en cuestión (Law A. M., 2016).

En ocasiones, la toma de datos consume un alto nivel de recursos o su recolección toma demasiado tiempo, por lo que, obtener una muestra grande de datos es poco factible o imposible. En estos casos se suelen utilizar las distribuciones triangular y beta. La distribución triangular proporciona una aproximación muy básica cuando se cuenta con poca información. Esta distribución está definida por el valor mínimo, máximo y el valor modal.

La distribución beta  $\beta(a, b)$  es ampliamente utilizada por la gran variedad de formas que puede adoptar de acuerdo al valor de sus parámetros; forma de "U", "J", "J invertida", y "parabólica unimodal" (Krishnamoorthy, 2006), esta última se considera similar a la curva de campana de la distribución normal, mientras que las "J,s" incorporan un sesgo adicional hacia la izquierda o hacia la derecha. Casos particulares son la distribución uniforme continua y la distribución triangular (donde la moda  $m$  es igual a alguno de los extremos en el rango donde está definida, es decir,  $m=a$  o  $m=b$ , (Herrerías , Palacios, & Herrerías)). Una de sus principales aplicaciones es en el método PERT (Program Evaluation Review Technique), como un modelo probabilístico para estimar la duración de actividades. En el método PERT se utiliza considerando solamente tres datos referentes al tiempo de duración de las actividades:

- ✓ Optimista (a): cuando todo sale bien, no existen errores ni retrasos.
- ✓ Mas probable (m): Considera la posibilidad de fallas y retrasos incrementado el tiempo respecto al optimista
- ✓ Pesimista (b): Considera un escenario con errores y retrasos de manera extrema, cuyo tiempo se incrementa de manera notoria respecto a los dos anteriores.

#### **3.2.2.4 Generador de números aleatorios**

En los modelos de simulación, la aleatoriedad es introducida por variables aleatorias independientes uniformemente distribuidas (Rubinstein & Kroese, 2017). A partir de una muestra aleatoria de números en el intervalo  $[0,1]$  es posible generar muestras aleatorias de otras distribuciones de probabilidad que representan el tiempo de duración de eventos y actividades, el comportamiento de las entidades y sus

relaciones, que en conjunto son capaces de representar sistemas estocásticos más generales. Por ejemplo, el tiempo entre la llegada de entidades al sistema o el tiempo de servicio de un banco.

De acuerdo con Rubinstein y Kroese (2017), inicialmente, la generación de números aleatorios se realizaba mediante técnicas manuales, como el lanzamiento de una moneda o un dado, manipulación de cartas o giros de ruletas. Posteriormente se utilizaron dispositivos mecánicos como diodos de ruido contador Geiger. Estos métodos quedaron atrás básicamente por tres razones:

1. Los métodos mecánicos son lentos
2. Las secuencias generadas pueden ser imposibles de reproducir
3. Se encontró que el conjunto de datos generados presenta sesgo y dependencia.

Actualmente, la mayoría de los generadores de números aleatorios se basan en simples algoritmos que pueden ser fácilmente implantados en la computadora. Son rápidos, requieren de poco espacio para ser almacenados y pueden reproducir fácilmente una secuencia dada de número aleatorios, dejando atrás los métodos basados en dispositivos mecánicos y las técnicas manuales.

Este tipo de generadores de números aleatorios también son conocidos como pseudoaleatorios ya que, aunque representan todas las propiedades estadísticas de una secuencia aleatoria, se encuentran bien definidos a partir de un conjunto de valores iniciales y un algoritmo determinístico.

La mayoría de herramientas computacionales para la simulación cuentan con un paquete de generación de números aleatorios, una rutina de software que genera números aleatorios independientes uniformemente distribuidos entre 0 y 1 (White & Ingalls, 2017) a partir de una semilla inicial dada por el usuario (Rubinstein & Kroese, 2017).

### **3.2.2.5 *Elaboración del modelo***

Como se mencionó anteriormente, un modelo es una entidad que se utiliza para representar otra entidad (ya sea existente o no) para un propósito específico (White & Ingalls, 2017). El modelo, dentro de un proceso de simulación es quizá el elemento más importante, ya que este elemento debe estar muy bien definido, de acuerdo con los objetivos de la simulación. Para crear un modelo de simulación adecuado es de suma importancia conocer y comprender el sistema del mundo real que es el sujeto de estudio a través de la simulación (Robinson S. , 2017).

Uno de los factores más importantes al realizar un modelo es el modelado conceptual, que se refiere a la abstracción del modelo de simulación desde la situación del mundo real (Robinson S. , 2017). El proceso de abstracción se relaciona con la simplificación en la representación del sistema, definiendo lo que se va a modelar y lo que no. Erróneamente se suele pensar que un modelo adecuado es aquel que capta el máximo nivel de detalle de la situación real en estudio, sin embargo, no es así, ya que modelos con demasiados elementos son difíciles de analizar y manipular, además de que requieren de mayor cantidad de recursos (datos, herramientas, personal y tiempo) y en ocasiones incluyen aspectos innecesarios para alcanzar los objetivos preestablecidos.

De acuerdo con Robinson (2017), la creación de un modelo comienza en la mente del modelador, como ideas o pensamiento acerca de un sistema real o nuevo. Posteriormente el modelo puede ser representado

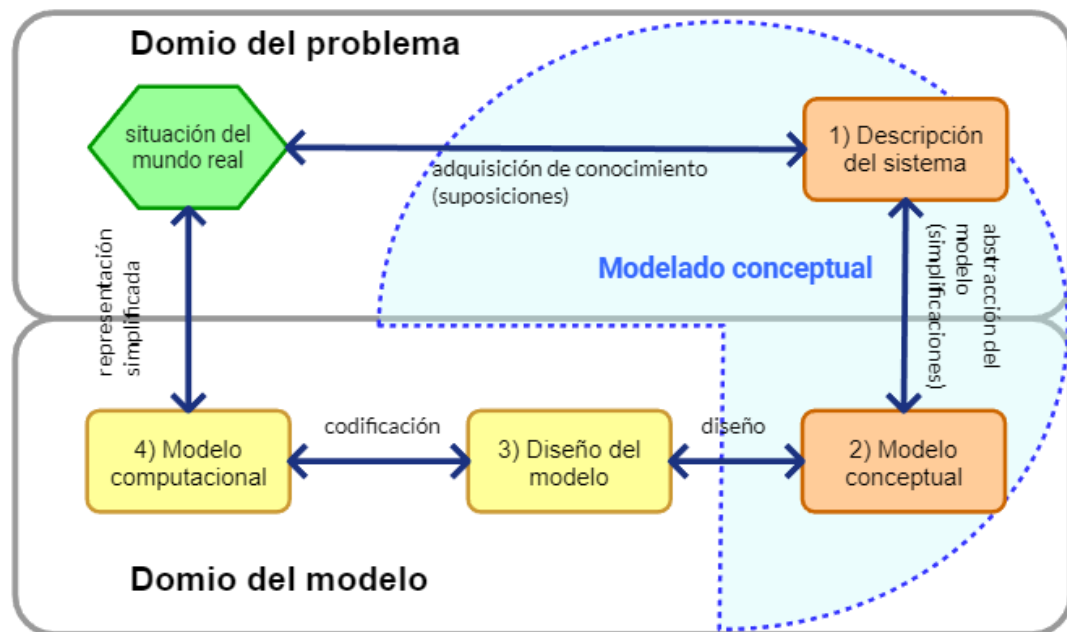
explícitamente a través de palabras, ideas escritas, expresiones matemáticas, dibujos o representaciones computacionales. De esta manera, modelar, se refiere a un proceso cognitivo de concebir un modelo.

Otro aspecto importante del modelo conceptual son las suposiciones, un concepto distinto al de simplificación (Robinson S. , 2017). Los supuestos son creencias o incertidumbres del mundo real que ayudan a describirlo cuando existen limitaciones de conocimiento o entendimiento. Por otro lado, la simplificación se refiere a un nivel de abstracción que se determina por gusto y factibilidad para un desarrollo y manejo rápido del modelo, y no por falta de conocimiento sobre la situación del mundo real que está siendo modelada.

Robinson (2017) define y describe cuatro fases para la creación de un modelo (Figura 3-2):

- 1) **Descripción del sistema:** Identificar la situación problemática y los elementos involucrado dentro del sistema real.
- 2) **Modelo conceptual:** La abstracción de la situación real.
- 3) **Diseño del modelo:** El diseño de los elementos necesarios para el modelo computacional (datos, parámetros, variables, relaciones)
- 4) **Modelo computacional:** Representación del modelo en un software.

Figura 3-2 Fases del proceso de modelado



Fuente: Tomado y adaptado de (Robinson S. , 2017)

De la Figura 3-2 podemos notar que el proceso surge a partir de una situación en el mundo real. Posteriormente las fases 1 y 2 conforman la modelación conceptual y es donde se involucran las suposiciones y simplificaciones, respectivamente. Las fases de diseño y elaboración del modelo computacional (fases 3 y 4) son independientes del software que se utilizara en la representación del modelo. Sin embargo, frecuentemente, la elección de un software específico influye en la elaboración del

modelado conceptual. Notemos que a pesar de que existe un orden en las cuatro fases (indicado con la numeración), a lo largo del proceso se suele regresar entre una etapa y otra, como un proceso de retroalimentación.

En los procesos de simulación donde el trascurso del tiempo es un elemento importante, por ejemplo, en la simulación del servicio de un banco, donde el objetivo es analizar el tiempo de espera de los clientes, es importante involucrar una manera de medir el tiempo de la simulación, así como un calendario o lista de eventos futuros que nos permita estructurar de manera ordenada y bien definida la ocurrencia de eventos y actividades a lo largo del proceso de simulación. Herramientas muy utilizadas para estos propósitos, como parte del modelo conceptual, son los diagramas de flujo y de procesos.

### **3.2.2.6 Validación y Verificación del modelo**

El objetivo de la verificación y validación es asegurar que el modelo es suficientemente adecuado. Los conceptos no son sinónimos, pero en ocasiones se utilizan como tal de manera errónea. Dado que el concepto de verificación tiene una definición muy limitada, puede considerarse como una parte del amplio proceso de validación (Robinson S. a., 2014). Ambos conceptos son importantes en el desarrollo del modelo ya que dos de los principales objetivos para los que son construidos es dar respuesta a situaciones desconocidas y como apoyo en la toma de decisiones; Entonces, si un modelo no es adecuado para cumplir sus objetivos, simplemente es un modelo poco funcional, y las decisiones y respuestas que surgen a partir de él no serán útiles ni confiables. Desde este punto de vista, es necesario conocer previamente los propósitos u objetivos del modelo. A continuación, se presenta la definición para cada concepto con el objetivo principal de comprender su diferencia, posteriormente se hablará con mayor detalle sobre cada uno.

**Verificación:** Asegurar que el diseño del modelo conceptual ha sido implementado como un modelo computacional de manera correcta. Debe realizarse para cada uno de los objetivos del modelo, es decir, si se pretende que el modelo de simulación de respuesta a más de una pregunta, entonces la verificación debe realizarse para cada una de las cuestiones (Sargent, 2015)

**Validación del modelo:** Justificar que el modelo computarizado posee un nivel satisfactorio de precisión consistente con los objetivos previos del modelo (Sargent, 2015), es decir, que representa de manera adecuada lo que se espera que represente. Un modelo se considera válido para un conjunto de condiciones experimentales si la exactitud del modelo se encuentra dentro de un rango aceptable.

El desarrollo de un estudio de simulación se puede estructurar en cuatro etapas que permiten identificar en qué momento son necesarios los procesos de verificación y validación, como se muestra en la Figura 3-3. A partir de este esquema, es fácil visualizar que existen diferentes tipos de validación: validación conceptual, validación de los datos, validación experimental y validación de resultados o de la solución. Mientras que la verificación solo se presenta como un proceso de validación entre el modelo conceptual y el modelo computacional

Como ya se ha mencionado anteriormente, el modelo requiere ser alimentado con datos confiables que permitan obtener resultados confiables y útiles. La validación de los datos es un proceso continuo a lo largo del desarrollo del modelo y del estudio de simulación, que está presente en todas las etapas. Cuando el fenómeno o sistema que está siendo modelado es observable, la recolección de datos puede ser utilizada tanto en el desarrollo del modelo como en su validación.

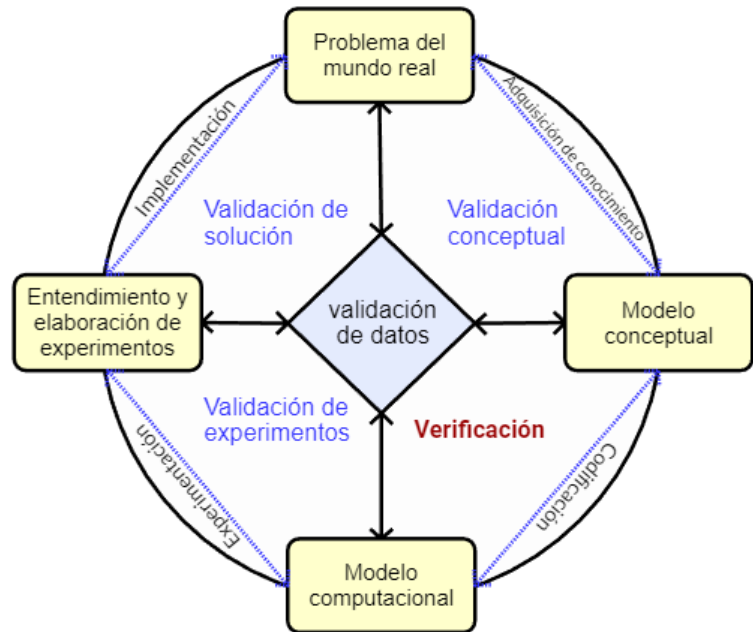


Figura 3-3 Verificación y validación en un modelo de simulación.  
Fuente: Tomado y adaptado de (Robinson S. a., 2014)

A continuación, se da una breve descripción de cada una de las validaciones que se presentan en la Figura 3-3

- **Validación de los datos**

Como ya se ha mencionado anteriormente, el modelo requiere ser alimentado con datos confiables que permitan obtener resultados confiables y útiles. La validación de los datos es un proceso continuo a lo largo del desarrollo del modelo y del estudio de simulación.

- **Validación conceptual**

De acuerdo con Sargent (2015), la validación conceptual se trata de dos aspectos:

- 1) Asegurarse de que las teorías y suposiciones del modelo conceptual son correctas, lo cual se puede evaluar por medio de análisis matemático y métodos estadísticos.
- 2) Hay que asegurar que la representación del modelo, su lógica, estructura y relaciones son correctos, razonables y consistentes con los objetivos del modelo. Un método para este aspecto es examinar modelos gráficos o diagrama de flujo, así como los conjuntos de ecuaciones que definen ciertos comportamientos.

Robinson (2014) menciona una pregunta guía para la correcta validación conceptual: ¿El modelo conceptual contiene los detalles necesarios para alcanzar los objetivos en el estudio de simulación?

- **Validación de la codificación (Verificación del modelo computarizado)**

Consiste en asegurarse de que el programa computacional y su implementación a partir del modelo conceptual se realizaron de manera correcta, es decir, se ha generado un modelo computacional en un lenguaje de simulación libre de errores en su programación. El punto de referencia en este caso es el modelo conceptual y directamente la situación del mundo real. Este tipo de validación se relaciona con

los lenguajes y niveles de programación utilizados en la implementación del modelo, tales como FORTRAN, C, C++, Python, Java, entre otros (Sargent, 2015) .

Hay que asegurar que cada parte del modelo computacional representa un elemento correspondiente en el mundo real, así como asegurar que en conjunto representan el sistema real. A estos dos procesos de validación, Robinson (2014), los llama *validación de caja blanca* y *validación de caja negra* respectivamente, y en este caso el punto de referencia es la situación real. Sin embargo, la referencia también puede ser un sistema idealizado que aún no existe.

- **Validación experimental**

Consiste en asegurar que el proceso experimental proporciona resultados adecuados a sus objetivos. Aspectos sobresalientes en este tipo de validación son la duración de la ejecución del modelo, distintos conjuntos de parámetros iniciales, varias réplicas y análisis de sensibilidad (Robinson S. a., 2014).

- **Validación de resultados**

Consiste en determinar si los resultados obtenidos del modelo completo son acordes con su objetivo (parecida la validación de caja negra). Toma lugar después de la implementación y validación del modelo computacional. El comportamiento de los datos de salida del modelo (o resultados) pueden ser explorado cualitativa o cuantitativamente (Sargent, 2015), como se presenta en la Tabla 3-4.

**Tabla 3-4 Exploración cualitativa y cuantitativa de los datos de salida de un modelo de simulación.**

<i>Tipo de exploración</i>	<i>Técnicas utilizadas</i>
<p><b>Exploración cualitativa</b> Se examina el comportamiento de los datos de salida y se evalúa si las magnitudes son razonables. Por ejemplo, un modelo de colas donde en promedio ingresan 50 clientes por hora al sistema, no sería posible tener como resultado que el promedio de clientes por hora es 100.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Validación por expertos que conocen la dirección y magnitud del comportamiento del sistema.</li> <li>✓ Exploración del modelo.</li> <li>✓ Interpretación de gráficos y animaciones.</li> <li>✓ Comparación con otros modelos de salida.</li> </ul>
<p><b>Exploración cuantitativa</b> Examina el comportamiento y precisión de las magnitudes de los datos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Análisis de sensibilidad y variabilidad de parámetros de probabilidad</li> <li>✓ <i>Si las variables de interés son variables aleatorias, parámetros como la media y la varianza son utilizados para la validación</i></li> <li>✓ Utilización de intervalos de confianza</li> <li>✓ Graficas de los datos de salida para estudiar su comportamiento</li> <li>✓ Ajuste de los datos de salida a una distribución</li> <li>✓ Comparación con otros modelos usando inferencias estadísticas.</li> </ul>

*Fuente: Elaboración propia (2020), a partir de (Sargent, 2015).*

Sin la validación adecuada en cada una de las etapas del desarrollo del modelo, sus resultados carecen de credibilidad. Por esta razón, la validación y verificación son aspectos críticos rigor y credibilidad del modelo y sus resultados. Sin embargo, existen algunas consideraciones que se deben tener presentes, ya que representan dificultades en los procesos de validación y verificación:

- 1) El modelo es válido para objetivos específicos (puede ser un solo objetivo), y no para diversas propuestas. En este sentido, un modelo puede ser válido para un objetivo y para otro no.
- 2) El modelo puede carecer de un punto de comparación real cuando el modelo es desarrollado para nuevas propuestas o cuando el fenómeno de interés (como resultado) no es observable.
- 3) Existen dificultades para obtener suficientes datos para comparar los resultados con la situación real. Por ejemplo, la recolección de datos requiere de mucho tiempo/recursos, o las condiciones del sistema real cambian constantemente.
- 4) La interpretación de la realidad es distinta para cada persona y un modelo puede ser válido para algunas personas e invalido para otras.
- 5) No hay suficiente tiempo/ recursos para validar todas las etapas en el proceso de desarrollo de la simulación.

### **3.2.2.7 *Elaboración de escenarios y experimentos***

La elaboración de escenarios y experimentos consiste en definir cómo examinar con el modelo de simulación para aprender sobre su comportamiento. El objetivo de los proyectos de simulación es tratar de entender los resultados del modelo original, así como los cambios que se generan cuando se realizan variaciones en los datos y parámetros de entrada con el objetivo de encontrar una combinación adecuada que mejore los resultados de interés. Para realizar un diseño de experimentos adecuado es muy importante tener en claro cuáles son los objetivos principales para los que fue realizado el modelo y planear anticipadamente la experimentación que se requiere, ahorrando tiempo y esfuerzo.

El diseño de experimentos puede ser de dos tipos (Kelton, 2000):

1. Un sistema de interés para analizar y entender, en donde los parámetros de entrada no son sujetos de modificación y en donde las principales cuestiones son: longitud de corrida, número de iteraciones/réplicas e interpretación de resultados
2. Un sistema en el que se busca la configuración de los datos de entrada que optimice algunos resultados de interés, en este caso es necesario decidir cuidadosamente cuales configuraciones considerar en cada corrida, además de las cuestiones del caso anterior.

Alguno de los resultaos que comúnmente se utilizan como indicadores de desempeño en los modelos de simulación son:

- La duración de un proceso
- La probabilidad de que un proceso dure mayor o menor tiempo que un valor específico
- La longitud máxima de una cola
- La ocupación de un recurso

Y para determinar ciertos indicadores se utilizan los datos de salida del modelo de simulación. Algunos paquetes de simulación computacional proporcionan por default un conjunto de datos de salida, pero

adicionalmente el usuario puede configurar el modelo para obtener otros datos. Una vez que se tiene el conjunto de datos se requiere de un análisis que permita conocer el comportamiento de los datos, para ello, comúnmente se utilizan las distribuciones de probabilidad, así como el valor esperado o la media de la distribución de los datos (Kelton, 2000). Por ejemplo: El número promedio de clientes que acuden que ingresan a un banco, la longitud máxima /mínima de la cola que se forma en un centro médico o el porcentaje de ocupación de una maquina en una fábrica.

Cuando el diseño de experimentos tiene como objetivo entender lo cambios que se generan a partir de la modificación de parámetros de entrada o factores lógicos en la estructura, el modelo de simulación puede concebirse como una función (Kelton, 2000), donde un vector  $y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_m,)$  representa el conjunto de datos de salida generados a partir de la estructuración del modelo (Función  $F_i$ ) y un conjunto de datos de entrada  $x = (x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$ . Los resultados pueden variar ya sea por la modificación de los datos de entrada, de la estructuración del modelo o de ambos factores a la vez.

<b>Representación de un modelo de simulación como función</b>	
<b>Modelo base:</b>	$(y_1, y_2, y_3, \dots, y_m, ) = F_1(x_1, x_2, x, \dots, x_n)$
<b>Modificación de los datos de entrada:</b>	$(z_1, z_2, z_3, \dots, z_m, ) = F_1(r_1, r_2, r_3, \dots, r_n)$
<b>Modificación de la estructuracion del modelo:</b>	$(w_1, w_2, w_3, \dots, w_m, ) = F_2(x_1, x_2, x, \dots, x_n)$
<b>Modificación de los datos de entrada y de la estructuracion del modelo</b>	$(s_1, s_2, s_3, \dots, s_m, ) = F_2(r_1, r_2, r_3, \dots, r_n)$

Los parámetros de entrada pueden tomar una gran cantidad de valores y la cantidad de parámetros también puede ser extensa lo que daría origen a un enorme conjunto de combinaciones que puede llegar a ser imposible de explorar en el modelo de simulación ya que, para obtener conclusiones de cada configuración implica una serie de corridas, que requieren de mucho tiempo y recursos, lo cual hace el proceso de análisis y experimentación imposible o poco factible. Por esta razón es importante definir cuidadosamente cuales son los parámetros o configuraciones lógicas de mayor importancia. Para esto, una primera etapa de experimentación ayudará a identificar los factores más importantes que se deben considerar. Posteriormente, una lista por orden de importancia (para el modelador, los miembros del sistema y los interesados en el modelo) puede facilitar la selección de factores importantes y la exclusión de aquellos con menor relevancia, reduciendo el número de combinaciones por estudiar. Una segunda etapa consiste en desarrollar un **metamodelo**, un modelo simple del modelo de simulación basado en los parámetros de entrada significativos que, generalmente se expresa en una ecuación de regresión de bajo grado (Law A. d., 2017).

Law (2017) utiliza los términos **factores** y **respuestas** para referirse a los parámetros de entrada del modelo (pueden ser de carácter cuantitativo o cualitativo) y los indicadores de desempeño de los resultados respectivamente. Utilizando estos términos, se presenta una breve descripción de dos de los métodos más utilizados: Diseño factorial  $2^k$  y Diseño factorial fraccional  $2^{k-p}$  (Law A. d., 2017).



- **Diseño factorial  $2^k$**

Si en un modelo de simulación existen  $k$  factores de interés, un primer enfoque consiste en mantener fijos  $k - 1$  factores y ejecutar el modelo de simulación variando un único factor. Cada factor puede tomar distintos valores, ya sean numéricos o categóricos, a los que se denomina **niveles**. Esto nos permite obtener una estimación inicial de como el factor variable afecta las respuestas. La mayor desventaja de este enfoque es que no permite medir la interacción entre los factores.

Las principales características del diseño factorial  $2^k$  son

- Supone dos niveles para cada factor que originan  $2^k$  combinaciones, cada una solicita la ejecución del modelo de simulación para conocer las respuestas. A cada una de las combinaciones generadas se le llama **punto de diseño** y los nivel suelen denotarse por -1 y 1 o “-” y “+”.
- Los niveles deben ser consultados con expertos y estar lo suficientemente distanciados (en el caso de valores numéricos o categóricos con orden) para proporcionar información útil.
- Se asume que la respuesta es aproximadamente lineal.
- Los puntos de diseño y la respuesta correspondiente son comúnmente representados por medio de una matriz de diseño (Tabla 3-5).

Tabla 3-5 Matriz de diseño de un diseño experimental  $2^2$

Punto de diseño	Factor 1	Factor 2	Respuesta
P1	-	-	R1
P2	-	+	R2
P3	+	-	R3
P4	+	+	R4

- Los resultados obtenidos pueden ser analizados con métodos estadísticos como análisis de varianza y la construcción de intervalos de confianza para los efectos esperados.

- **Diseño factorial fraccional  $2^{k-p}$ .**

Se trata de un diseño experimental que considera solo un subconjunto de tamaño  $2^{k-p}$  (con  $0 < p < k$ ) de todos los  $2^k$  puntos de diseño de un diseño experimental  $2^k$ . Este método demanda menor cantidad de esfuerzo computacional y tiempo en la ejecución del modelo de simulación.

El diseño factorial  $2^k$ , para  $k$  factores se generaliza al considerar  $A$  niveles para cada factor y da origen a  $A^k$  puntos de diseño. Una situación aún más general se presenta cuando el número de niveles para cada factor es diferente. Entre mayor sea el número de factores y el número de niveles para considerar, el espacio de configuraciones a evaluar crece.

Cuando el objetivo es encontrar una configuración que optimice los resultados del modelo surge la utilidad de los metamodelos que permiten integrar en un modelo sencillo la correlación entre factores. Diferentes métodos de búsqueda heurísticos se pueden aplicar para obtener una configuración adecuada.

### 3.2.2.8 Interpretación de resultados

Es común que en el desarrollo de los procesos de simulación se invierte demasiado tiempo en la codificación del modelo, y relativamente poco tiempo y esfuerzo al análisis e interpretación apropiado de los datos de salida lo cual, con alta probabilidad, implica realizar inferencias erróneas sobre el sistema en cuestión. Usualmente, los modelos de simulación no son determinísticos, sino estocásticos, es decir, al menos uno de sus parámetros está sujeto a algún tipo de aleatoriedad, por lo que resultados obtenidos de diferentes replicas pueden ser muy diferentes. Entonces claramente, una única ejecución del modelo no responde las preguntas de interés como objetivos del modelo de simulación (White & Ingalls, 2017), (Law A. M., 2015). Otra razón por la cual la clara definición de objetivos es indispensable es la definición adecuada del estado inicial del sistema. Por ejemplo, en la simulación de un centro comercial que presta servicio en un horario de 7:00 am a 10:00 pm, si el objetivo es determinar la cantidad de clientes dentro del sistema en las últimas tres horas de servicio (de 7:00 – 10:00 pm) es erróneo asumir que la simulación debe comenzar con la tienda totalmente vacía. Sin embargo, si el objetivo es analizar el comportamiento durante las tres primeras horas de servicio en un día, entonces esta condición inicial es adecuada.

Los modelos de simulación pueden clasificarse en dos grandes categorías y el enfoque para analizar resultados es distinto. La Tabla 3-6 presenta las principales características de cada categoría y algunos ejemplos.

**Tabla 3-6 Categorización y enfoque de análisis de resultados en los modelos de simulación.**

	<i>Con terminación definida</i>	<i>Sin terminación definida</i>
Características	Existe una condición de paro en la simulación, generalmente la ocurrencia de un evento. Si la duración de tal evento no es determinística, la duración de una ejecución del modelo puede variar en replicas diferentes.	No existe un evento que determine la finalización del evento.
Ejemplos	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Simulación de una jornada de trabajo en banco (un día)</li> <li>✓ Simulación de la elaboración de 100 piezas de producto terminado sin defectos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Simulación de un segmento de carretera.</li> <li>✓ Simulación continua de un proceso de producción en condiciones normales.</li> </ul>
Enfoque del análisis de resultados	Análisis de un conjunto de variables aleatorias independientes provenientes, cada una, de replicas independientes que pueden ser comparables y analizados con métodos estadísticos clásicos.	Al no tener definido un punto de paro en la simulación, el objetivo es definir y analizar el comportamiento del sistema en <b>estado estable</b> .

*Fuente: Elaboración propia (2020)*

Existen métodos estadísticos que permiten analizar el comportamiento de los resultados de salida, aplicables y válidos a un conjunto de datos y no a un único valor. La utilización de métodos como la *estimación de intervalos de confianza* y *estimación de percentiles* es adecuada para analizar variables aleatorias independientes, provenientes de modelos de simulación con terminación definida, que presentan comportamientos transitorios a lo largo de toda la duración del modelo. White y Ingalls (2017)

indican que al menos 30 réplicas son suficientes para obtener intervalos de confianza adecuados (intervalos pequeños). Pero ¿qué sucede con los modelos de simulación sin terminación definida?, ¿cuál es la duración adecuada de cada réplica para conseguir resultados confiables? Como se menciona en la Tabla 3-6 anterior, el objetivo es determinar cuándo se ha alcanzado un estado estable en las variables de interés. Consideremos el siguiente ejemplo.

**Ejemplo:** Un modelo de simulación de una caseta de cuatro cajeros electrónicos, en donde el principal objetivo es determinar el número de clientes en la zona de espera. El modelo puede ejecutarse como uno sin condición de paro.

Al inicio de la simulación, la caseta se encuentra vacía y a medida que pasa el tiempo, el número de clientes dentro del sistema incrementa. Si se grafica el número de clientes dentro del sistema contra el tiempo de la simulación es posible apreciar un periodo inicial donde la variable de interés incrementa, antes de conseguir un comportamiento estable (Gráfica 3-1). Tratar con el comportamiento de los datos de salida al inicio de la simulación es conocido como el *problema de inicio transitorio* (Law A. c., 2015). Si los resultados pertenecientes a este periodo transitorio son considerados en la formulación de conclusiones, el comportamiento del sistema probablemente sea erróneo (Currie & Cheng, 2016). La principal técnica utilizada para evitar este error es conocida como *periodo de calentamiento del modelo* que consiste en identificar el punto crítico del tiempo en que termina el periodo transitorio inicial y comienza el periodo del estado estable de la variable de interés, continuando con un análisis que deja fuera de consideración los datos del periodo inicial.



Gráfica 3-1 Ejemplo del comportamiento del valor estadístico de salida a través del tiempo de simulación.  
Tomado y adaptado de (Currie & Cheng, 2016)

Existe un gran número de métodos utilizados para identificar el periodo de calentamiento. Uno de los enfoques más utilizados por su sencillez es el método gráfico que consiste en examinar las estadísticas de salida como series de tiempo (similares a la Gráfica 3-1).

Ejemplos completos del uso de formulaciones matemáticas y de las técnicas más utilizadas se pueden encontrar en (Law A. c., 2015), (Currie & Cheng, 2016) y (White & Ingalls, 2017).

### 3.2.2.9 Actividades en un estudio de simulación

Las actividades previamente descritas forman parte de la estructuración de un modelo de simulación, sin embargo, no se ha indicado un panorama general que las relacione.

A continuación, la Figura 3-5, presenta un esquema que integra los conceptos y actividades descritos previamente, en torno al proceso de simulación. Este esquema es bastante representativo, ya que permite identificar cuales actividades deben realizarse antes y después del modelo de simulación.

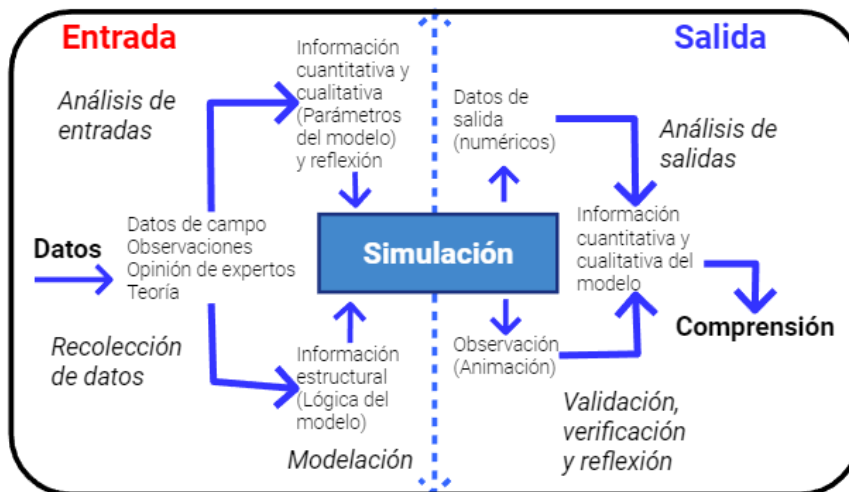


Figura 3-5 Actividades en un estudio de simulación.  
Tomado y adaptado de (White & Ingalls, 2017)

La figura anterior no indica un orden estricto en la realización de las actividades. Aunque el orden de algunos pasos es indiscutible, es necesario establecer un estricto orden que defina una secuencia metodológica en la elaboración de un proyecto de simulación.

La Figura 3-4 sugiere una secuencia, sin embargo, Law (2015) enfatiza que no se trata de un proceso lineal que avanza en una sola dirección, sino que se trata de un proceso cíclico que puede requerir el retorno a pasos anteriores como parte de la verificación y validación adecuada del modelo y del estudio en general. Estructuras similares a la ilustrada en la Figura 3-4 pueden ser encontradas en (Law A. M., 2015) y (Banks, 1998).

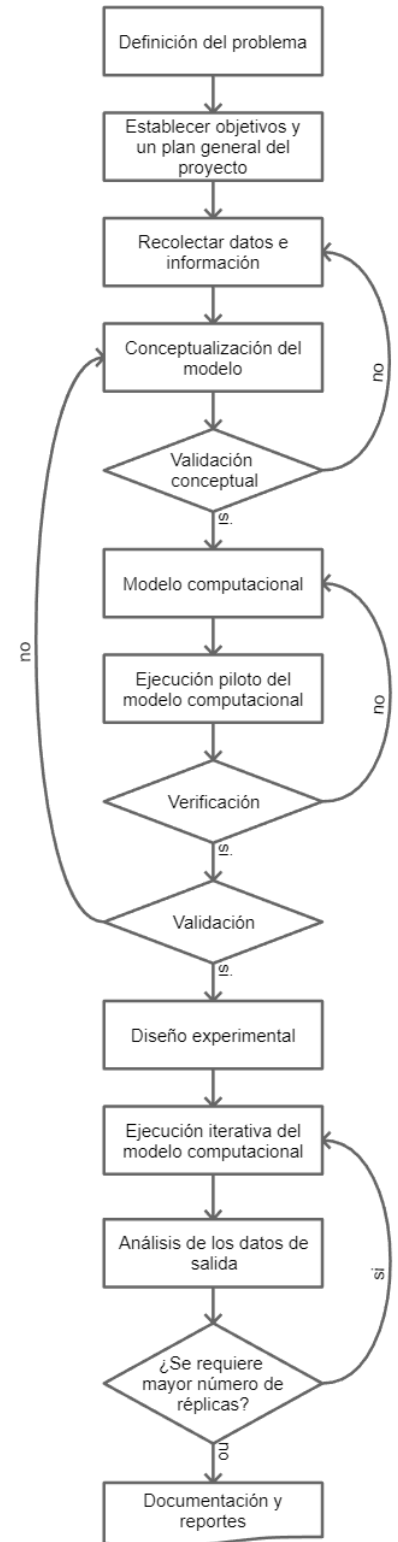


Figura 3-4 Orden en las actividades para el desarrollo de un estudio de simulación.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 Herramientas computacionales para el desarrollo de modelos de simulación

Cuando hablamos de un modelo de simulación computacional, como los que se desarrollaron para este trabajo, implícitamente estamos hablando de un software que nos permite desarrollar el modelo. La elección de un software es un aspecto importante en el desarrollo de un estudio de simulación, puesto que se deben tener en cuenta cuestiones como: flexibilidad de modelación, facilidad de uso, requerimientos de hardware y software, gráficos, reportes de salida y costos. Al tratarse de modelos de simulación, también es importante considerar aspectos como la generación de variables aleatorias, la estructura lógica del modelo, la recolección de datos y estadísticas, y la presentación de resultados.

Básicamente, los softwares utilizados para el desarrollo de los modelos de simulación pueden clasificarse en dos categorías: Los *paquetes de simulación*, que cuentan con funciones predefinidas y que facilitan la estructuración de los modelos de simulación, y los *lenguajes de programación de propósito general*, los cuales permiten al usuario construir el modelo, ofreciendo gran flexibilidad para la creación de funciones y estructuras personalizadas. A continuación, la Tabla 3-7 presenta una serie de características para cada una de las dos categorías:

Tabla 3-7 Software para el desarrollo de modelos de simulación

	<i>Paquetes de simulación</i>	<i>Lenguajes de programación de propósito general</i>
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Proporcionan funciones y características necesarias para la creación de modelos de simulación de manera automática (entidades, atributos, recursos, tiempo de simulación)</li> <li>▪ Proporcionan un entorno natural para el modelado de simulación.</li> <li>▪ Resulta fácil la modificación de parámetros y sentencias estructurales del modelo.</li> <li>▪ Generalmente, la detección de errores resulta fácil, y muchos de los errores de sintaxis son corregidos de manera automática.</li> <li>▪ (Algunos) Cuentan con herramientas visuales que apoyan la interpretación de resultados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ofrecen flexibilidad en la estructuración del modelo.</li> <li>▪ Permite crear funciones personalizadas.</li> <li>▪ Por lo general, requieren menor tiempo de ejecución y recursos computacionales que los paquetes de simulación.</li> <li>▪ La mayoría de los modeladores conoce al menos un lenguaje de programación.</li> <li>▪ Son de bajo costo.</li> <li>▪ Puede ser utilizado para modelos de diferente carácter (eventos discretos, eventos continuos, agentes)</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Existe una gran variedad de paquetes de simulación, pero son poco conocidos.</li> <li>▪ En general requieren de mayor cantidad de recursos computacionales que los modelos desarrollados con lenguajes de programación de propósito general.</li> <li>▪ Son paqueterías de alto costo (en muchos casos)</li> <li>▪ Ofrecen las herramientas para el desarrollo de un tipo específico de modelo (eventos discretos, eventos continuos, agentes)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Implica mayor tiempo de programación.</li> <li>▪ No cuenta con funciones predefinidas de simulación que faciliten el desarrollo de una amplia variedad de modelos.</li> <li>▪ No cuenta con herramientas gráficas muy sofisticadas.</li> <li>▪ La generación de resultados gráficos puede implicar mayor tiempo de modelación.</li> </ul>
	Ejemplos: Anylogic, Simio, FlexSim, Arena, ExtendSim	Ejemplos: Python, C/C++, R, Java, JavaScript, PHP

Fuente: Elaboración propia (2020) a partir de (Law A. M., 2015), capítulo 3.

Además de los aspectos antes mencionados, existen dos cuestiones de suma importancia que conducen a una elección definitiva de un software: objetivos y recursos disponibles:

### ***Objetivos***

Este es quizá el aspecto más importante a considerar, puesto que tener claro el objetivo del modelo nos permite definir cuáles son las características necesarias mínimas para desarrollarlo. Si, por ejemplo, se busca desarrollar un modelo donde las herramientas gráficas son parte de los objetivos principales, convendrá utilizar paquetería de simulación ya que, generalmente, ofrecen mayor calidad de gráficos y animaciones. Por el contrario, si los aspectos gráficos no son de suma importancia para un modelo, entonces la elección de un lenguaje de programación es la mejor opción.

### ***Recursos disponibles***

Este aspecto, más que una directriz para la elección de un software adecuado constituye las restricciones que el modelador puede tener. No solo se trata de limitaciones de hardware y software, sino de tiempo y conocimiento. Es posible que, considerando los objetivos para los que se requiere desarrollar un modelo, tengamos distintas opciones para elegir un software, sin embargo, podremos descartar aquellos que requieren más de los recursos disponibles (memoria RAM, tarjeta gráfica, tiempo de ejecución, tiempo para estructurar el modelo o tiempo para aprender a utilizar el software). El modelador debe considerar el tiempo disponible con el que cuenta para el desarrollo del modelo y las expectativas del cliente.

Un escenario probable es que después de considerar distintos aspectos para la elección del software, se tenga más de una posibilidad que es adecuada para cumplir el objetivo, en este caso, la experiencia y conocimientos del desarrollador son un factor importante.

En el desarrollo de este trabajo se utilizaron distintos tipos de modelación y distintos softwares para su implementación. El primer modelo M1 tiene el objetivo de estimar la demanda de pasajeros que utilizan algunas rutas de transporte público. Los parámetros de entrada fueron establecidos de diferentes maneras de acuerdo con la información obtenida en la recolección de datos y la estructura del modelo de simulación es bastante específica, por lo que el modelo fue desarrollado en Python, un lenguaje de programación de propósito general. Los modelos M2 y M3, en cambio, fueron desarrollados en hojas de Excel puesto que se trata de modelos sencillos cuyo objetivo es perfectamente satisfecho con las herramientas de este software. Además, no requieren de estructuras lógicas altamente personalizadas como en el caso de M1. Los resultados de M3 fueron comparados con los obtenidos de un modelo de programación lineal, el cual fue resuelto con las herramientas de Solver de Excel. Finalmente, el modelo M4 tiene como objetivo visualizar y comprender el comportamiento conjunto de una comunidad automóbiles. Dados estos objetivos, se consideró necesario utilizar una paquetería de simulación que predefinidamente contara con funciones y herramientas visuales adecuadas. En este caso se utilizó el software Anylogic, el cual permite la modelación basada en agentes que se adecua a las necesidades del modelo M4.

Como anteriormente fue mencionado, existen diversos softwares que permiten alcanzar los objetivos y necesidades del modelo, sin embargo, para el desarrollo de este trabajo, fueron elegidos aquellos en los que la autora tenía conocimientos previos. A continuación, se presenta una breve descripción de dichos Software.

- *Python*

Es un lenguaje de programación de propósito general, interpretado, dinámico y multiplataforma. Los lenguajes interpretados permiten generar resultados idénticos o del mismo tipo a partir de un mismo código, sin importar el dispositivo y sistema utilizado para su ejecución. Mientras tanto, los lenguajes no interpretados, también conocidos como compilados, generan los mismos resultados únicamente al ser ejecutados en dispositivos con características similares específicas. Su sintaxis propia es bastante amigable y semejante a la de otros lenguajes de programación como C y C++ por lo que resulta fácil de aprender para quienes han programado previamente en otro lenguaje de programación e incluso para quienes comienzan su camino como programadores. Este es un lenguaje de programación de código abierto que además cuenta con amplia documentación para su uso, tanto en su página oficial (Python Software Foundation, 2020) como en la comunidad de usuarios a partir de distintos sitios web. Por otro lado, permite la programación orientada a objetos y cuenta con diversas paqueterías que apoyan en el desarrollo de código y mejoran la experiencia del usuario al ofrecer funciones orientadas a distintas aplicaciones como el desarrollo de páginas web, manejo de bases de datos, educación y redes. Todas estas características en conjunto definen a Python como un lenguaje de programación poderoso, flexible, multiparadigma y fácil de utilizar, cuya comunidad de usuarios se encuentra en constante crecimiento.

- *Excel*

Excel forma parte de la paquetería de Microsoft Office. Cuenta con una interfaz amigable y fácil de utilizar. Este software permite organizar, analizar y visualizar información de manera ordenada, eficaz y sencilla por medio de hojas de cálculo que permite la manipulación de la información en formatos de tabla. Permite generar variables aleatorias, establecer sentencias lógicas básicas y visualizar información y resultados por medio de graficas de distintos tipos, apoyando la interpretación de resultados. Estas funciones resultan suficientes para la implementación de modelos de simulación sencillos del tipo Monte Carlo, en los cuales no existe gran interés por visualizar animaciones que representen la estructura lógica del modelo.

Excel cuenta con el complemento Solver, capaz de resolver modelos de programación lineal y no lineal, encontrando valores óptimos sujetos a un conjunto de restricciones o limitaciones en los valores de algunas celdas en una hoja de cálculo. Entre las restricciones que se permiten, se encuentra definir el tipo de variable (real, entera, positiva, negativa), en el caso de las variables de decisión, que son aquellas que definen el valor máximo o mínimo en la función objetivo. Opcionalmente, Solver permite establecer el método y la generación de reportes adicionales a la solución, por ejemplo, el reporte adecuado para el análisis de sensibilidad del modelo resuelto.

Excel cuenta con amplia documentación por medio de manuales, libros y material audiovisual que puede ser consultado directamente en la página oficial de Microsoft (Microsoft, 2020), o bien, en diversos sitios web ajenos como YouTube. Además, la paquetería de Excel cuenta con una sección de ayuda en la que los usuarios pueden consultar la sintaxis de las funciones, así como visualizar ejemplos que apoyan el aprendizaje.

- *Anylogic*

Anylogic es un paquete de simulación que cuenta con herramientas visuales como gráficos dinámicos y animaciones en dos y tres dimensiones. Permite el desarrollo de tres métodos modernos de simulación: sistemas dinámicos, eventos discretos y modelación basada en agentes, así como modelos de simulación híbridos. Cuenta con distintos tipos de estructuración que permiten definir la estructura lógica del modelo a partir de diagramas de flujo, diagramas de estado, diagramas de acción y diagramas de stock. También cuenta con librerías que facilitan la elaboración de modelos en diversas áreas de aplicación como: modelación de procesos y flujos, modelación del transporte (vías ferroviarias, tráfico vial, movimiento peatonal, terminales, aeropuertos, estacionamientos, estaciones, etc.), y, procesos y movimientos de fabricación y almacenamiento. El uso de estas librerías puede combinarse para elaborar modelos en otras áreas de aplicación. Cada librería cuenta con elementos cuyas características predefinidas son especializadas en su área de aplicación y facilitan al modelador la implementación del modelo. Pero además cuenta con funciones que permitan definir funciones y objetos completamente nuevos y personalizados a partir de sentencias simples y cortas. Anylogic utiliza el lenguaje de programación Java, y su interfaz permite al usuario definir nuevas funciones sin necesidad de interactuar directamente con el código del modelo completo. Anylogic se encarga de estructurar automáticamente en código Java la mayoría de las instrucciones definidas por el usuario, generalmente introducidas en formularios predefinidos. No obstante, para modelos personalizados, es importante conocer los conceptos básicos de la sintaxis de Java. Anylogic, cuenta con una sección de ayuda que orienta al usuario en el uso tanto de funciones predefinidas como en sentencias y sintaxis de Java, además existen manuales y gran documentación disponible en el sitio web oficial (The Anylogic Company, 2020). Anylogic cuenta con una versión personal de aprendizaje sin costo y que cuenta con los recursos disponibles para elaborar modelos sencillos, incluyendo librerías como Road Traffic, la principal librería utilizada para implementar el modelo M4 de este trabajo, ya que sus funciones resultan adecuadas para cumplir las necesidades y objetivos del modelo.



## 4 Descripción de la región de estudio

En este capítulo se describe la región de estudio a lo largo de cuatro secciones. La primera, corresponde a las características generales y los elementos más importantes que la definen como una región de interés. En la segunda sección, se presenta la descripción detallada de la región, fraccionada en 5 zonas, definidas en la etapa de recolección de datos. Posteriormente, en las secciones 3 y 4 se describen los aspectos operativos de camiones y unidades de Metrobús dentro de la región.

El objetivo de este capítulo es presentar la región de estudio considerándola un sistema compuesto por calles, avenidas, unidades de transporte público, vehículos particulares, personas e instituciones (escuelas, oficinas, hospitales, etc.). Además, se exponen las interacciones que existen entre los elementos y las situaciones que surgen a partir de dicha interacción, es decir, desde un enfoque sistémico que logre familiarizar al lector con la región de estudio.

El capítulo aborda las características del sistema que fueron observadas entre 7:00 y 10:00 am, horario que fue definido para obtener información del sistema de manera presencial. Particularmente, las secciones 3 y 4 presentan información cuantitativa obtenida en dicho horario. Pese a la importancia que la etapa de recolección de información tiene para describir las zonas, los detalles se exponen hasta el capítulo 5 *Propuesta y metodología* (pág. 95), donde se hace referencia a elementos del sistema descritos a lo largo de este capítulo.

### 4.1 Características generales

La Figura 4-1 nos permite ubicar geográficamente la región, tanto en la CDMX como en la alcaldía Coyoacán.

La alcaldía Coyoacán presenta alta afluencia de viajes. De acuerdo con la EOD (2017), en un día entre semana se realizan 687 mil viajes que sitúan a la alcaldía en las siguientes posiciones:

- Posición número 7 de las alcaldías de la ZMVM con mayor cantidad de viajes con origen y destino dentro de la misma alcaldía (EOD, 2017).
- Posición número 4 de las alcaldías con mayor número de viajes externos. Sus principales destinos son: Tlalpan, Iztapalapa y Benito Juárez con 113, 115 y 75 mil viajes respectivamente (EOD, 2017).

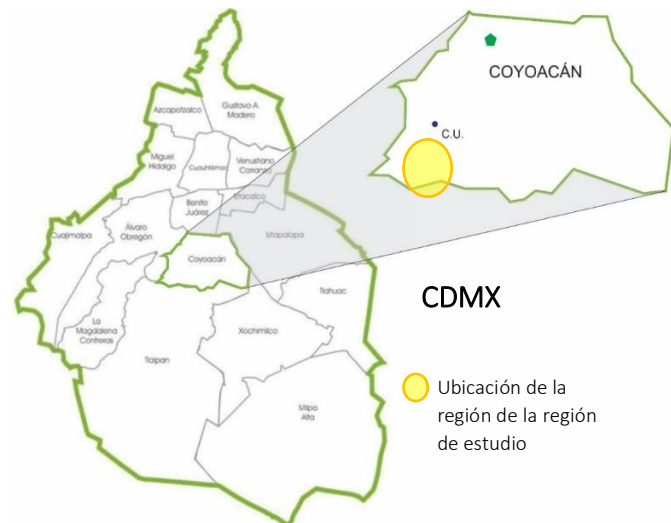


Figura 4-1 Ubicación geográfica de la región de estudio  
Fuente: Elaboración propia.

Las principales vialidades involucradas en la región de estudio son: Av. Antonio Delfín Madrigal, Av. Imán, secciones del anillo Periférico Blvd. Adolfo López Mateos y Av. Insurgentes Sur (ver Figura 4-2). De manera secundaria se involucran pequeñas calles con menor capacidad de flujo vehicular y cuya función es proporcionar conexión entre las vialidades antes mencionadas. En toda la región de estudio existen instituciones e instalaciones como escuelas, hospitales, estaciones de Metro o Metrobús, para las cuales un gran número de personas tiene la necesidad de congregarse y en consecuencia de transitar por los alrededores.



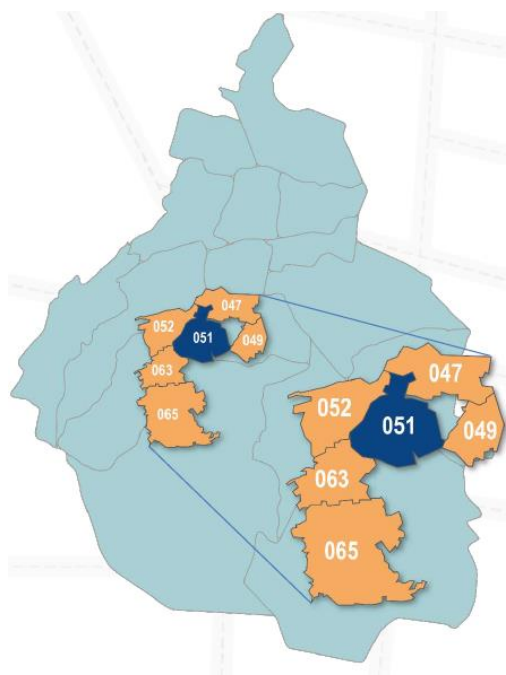
Figura 4-2 Principales vialidades de la región de estudio.

Fuente: Elaboración propia (2020)

Es de suma importancia tener en cuenta factores de carácter cualitativo, como la descripción detallada de situaciones, eventos, interacciones entre individuos, grupos y colectividades (Sampieri, Fernández, & Bautista, 2010), que nos permiten comprender de mejor manera las actividades que suceden en cualquier zona a estudiar. En este caso, la ubicación del campus central de la UNAM, conocido comúnmente como Ciudad Universitaria (CU), tiene un papel importante, debido a que es la universidad con mayor número de estudiantes, tanto en México como en Latinoamérica, atendiendo alrededor de 360, 827 alumnos en el ciclo escolar 2019-2020 (UNAM, 2020). Aunque no todos los estudiantes pertenecen al campus central de la universidad, CU, a sus alrededores se produce un alto nivel de movilidad ya que además de instalaciones

educativas, en el campus se encuentran instalaciones deportivas y culturales a las que acceden alumnos, profesores, visitantes y trabajadores.

De acuerdo con los resultados de la EOD 2017, en un día entre semana, se registran 304 mil viajes con origen en CU y 303 mil viajes con destino a CU. De los últimos, casi 115 mil son por motivo de estudio y los cinco principales distritos de origen son: Viveros, Xotepingo, La Magdalena Contreras, Olivar de los Padres-San Jerónimo y Padierna (Figura 4-3).



Distrito de origen		
Clave	Nombre	Miles de viajes
047	Viveros	4.6
049	Xotepingo	4.1
063	La Magdalena Contreras	4.0
052	Olivar de los Padres- San Jerónimo	3.6
065	Padierna	2.7

Figura 4-3 Principales distritos de origen de viajes por motivo de estudio al distrito CU.  
Fuente: (EOD, 2017)

## 4.2 Descripción de zonas

Las vialidades Av. Antonio Delfín Madrigal y Av. Imán pertenecen a la región de estudio y se ubican en el contorno de CU, por lo que mantienen una relación directa en diversas entradas y salidas de esta institución.

La magnitud de la región de estudio completa implica traslados a pie de alta duración. Con el objetivo de recopilar información, la región se fragmentó en cinco zonas de menor tamaño que permiten traslados cortos y de poca duración aprovechando el mayor tiempo posible en la recolección de datos e información dentro del horario de interés (de 7:00 am a 10:00 am). La Figura 4-4 ilustra los cortes sobre las principales vialidades que delimitan cada zona, posteriormente se presenta una descripción detallada para cada caso.



Figura 4-4 Delimitación de zonas en la región de estudio.  
Fuente: Elaboración propia (2020)

#### 4.2.1 Descripción de la Zona 1

La principal vialidad de esta zona es la Av. Antonio Delfín Madrigal en sus dos direcciones (A-B, y B-A, Figura 4-5). Sobre esta vialidad se encuentran dos retornos; **a** y **b**. Aunque el retorno **b** pertenece a la zona 2, es necesario tenerlo en cuenta desde ahora, ya que ambos retornos permiten la conexión entre los dos sentidos de la avenida.

Uno de los elementos más importantes de esta zona es la estación terminal Universidad de la línea 3 del STC Metro que se encuentra sobre la Av. Antonio Delfín Madrigal. De acuerdo con el volumen de pasajeros que utilizan la estación, los alrededores de esta se han convertido en un Centro de Transferencia Modal (CETRAM) de Coyoacán, en donde comienza el recorrido de trece rutas de transporte público, las cuales tienen diferentes puntos destino, pero una gran cantidad de ellas transita por Av. Delfín madrigal y Av. Del Imán, como una sección troncal en común.

Sobre Av. Antonio Delfín Madrigal, a los alrededores de la estación del metro, existen desviaciones de la vialidad principal, que sirven como paraderos de las rutas. No existe un nombre oficial para estos paraderos ni para las desviaciones, pero en este trabajo se han nombrado Paradero 1, Paradero 2, Paradero 3, etc., de acuerdo con la Figura 4-5<sup>7</sup>.

En este trabajo, el tránsito de unidades de transporte público es un factor importante en el flujo vehicular de la zona, pero no es de interés el recorrido completo de cada ruta, sino, solamente en la fracción del recorrido dentro de la región de estudio.

A continuación, la Tabla 4-1 indica la numeración de las rutas, la cantidad de ramales diferentes y cuáles de las principales vialidades de la región de estudio forman parte de su recorrido. Notemos que 7 de las 13 rutas (R40, R1.3, R60, R111, R76, R76.1 y R112), utilizan tres de las vialidades principales dentro de la región de estudio.

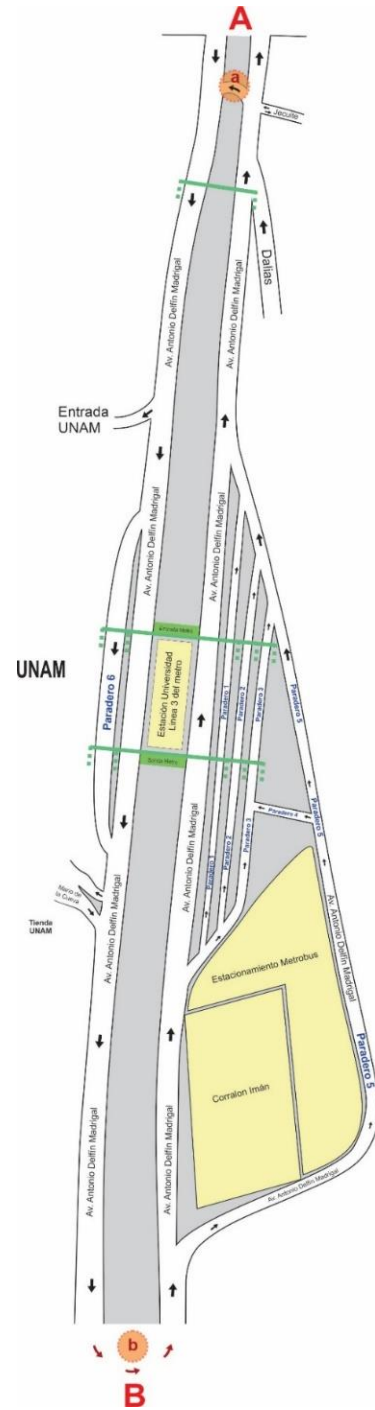


Figura 4-5 Zona 1 de la región de estudio. Fuente: Elaboración propia (2020).

<sup>7</sup> Algunas personas que laboran sobre el Paradero 5, reconocen la vialidad con el nombre de Antonio Delfín Madrigal (como el nombre de la vialidad principal) y algunos otros con el nombre de Dalias o Paseo de CU. En la intersección de los paraderos 4 y 5

Tabla 4-1 Datos generales de rutas que tienen estación terminar en CETRAM Universidad

Ruta	Ramal	Av. Antonio Delfín Madrigal	Av. Del Imán	Bldv. Adolfo López Mateos (Periférico)
R40	1	✓	✓	✓
	2			
R1.1	1	✓	✗	✗
	2			
R1.2	1	✓	✓	✗
R1.3	1	✓	✓	✓
	2			
R95	1	✓	✗	✗
	2			
R29.1	1	✓	✗	✗
	2			
R29.2	3	✓ entrada y salida <sup>8</sup>	✗	✗
R60	1			
	2			
	3	✓	✓	✓
	4			
	5			
RTP <sup>9</sup>	1			
	2	✓	✗	✗
	3			
	4			
	5			
	6	✓ entrada y salida	✗	✗
	7			
R111	1	✓	✓	✓
R76	2	✓	✓	✓
	3			
R76.1	1	✓	✓	✓
R112	2	✓	✓	✓

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con entrevistas realizadas a los despachadores de CETRAM Universidad, se sabe que existen tres rutas número 1, las cuales operan y son administradas de manera independiente, por distintas organizaciones. Un caso similar se presenta con las rutas 29 y 76.

Para hacer distinción entre rutas con el mismo número, en el resto de este trabajo, se utilizará la nomenclatura RX.Y, donde X indica el número de ruta y Y = 1,2 o 3 define una clasificación adicional,

existe un letrero que indica el nombre “M. de Juárez” para el paradero 4 y “Dalias” para el paradero 5. Para evitar incertidumbre con respecto al nombre oficial, a lo largo de este trabajo, se continuarán nombrando Paradero 4 y 5.

<sup>8</sup> La leyenda “entrada y salida” indica que los recorridos de las líneas no transitan por toda la sección de Av. Delfín Madrigal, sino que únicamente recorren el segmento comprendido entre los retornos **a** y **b** para entrar y salir de la base al inicio y final de sus recorridos






<sup>9</sup> Para este estudio se considera un conjunto de 7 líneas como una ruta denominada RTP, sin embargo, de acuerdo con la información (México\_c, 2018) cada línea es una ruta diferente con base origen o destino en CETRAM Universidad.



exclusiva de trabajo. En el caso de la ruta 76, las líneas que operan con camiones serán nombradas como “R76”, mientras que las rutas operando con vagonetas serán referidas como “R76.1”.

Las rutas operan con distintos tipos de vehículos que pueden ser clasificados por su apariencia física como lo sugiere la Tabla 4-2. Cabe mencionar que los rangos de capacidad son una estimación de los espacios disponibles para pasajeros sentados y parados, ya que en vehículos del mismo tipo existen variaciones en cuanto a la cantidad de asientos. Esta clasificación fue un aspecto muy importante en la etapa de recolección de datos puesto que conocer el tipo de vehículos con los que una ruta opera permitió identificar visualmente las rutas.

**Tabla 4-2 Categorías de los vehículos que operan las rutas de interés dentro de la región de estudio.**

Categoría	Notación	Rangos de capacidad <sup>10</sup>		Rutas que lo utilizan	Imagen
		Pasajeros sentados	Pasajeros parados		
Autobús RTP	<b>RTP</b>	[35,45]	50	RTP	
Camión Verde	<b>CV</b>	[29,33]	29	R40, R60, R76, R1.3.	
Camión Morado	<b>CM</b>	[32,36]	35	R1.1, R1.2, R1.3, R111	
Camión Morago Grande	<b>CMG</b>	[40,45]	45	R111, R112	
Microbús	<b>M</b>	[18,24]	21	R1.3	
Vagoneta	<b>V</b>	[16,29]	5	R76.1, R95, R29.1, R29.2	

Fuente: Elaboración propia (2020).

En el resto de los capítulos se utilizará el concepto **Unidad de Transporte Público** (UTP) para referirse a cualquier tipo vehículo de la Tabla 4-2. No obstante, el término **camión**, será utilizado ocasionalmente de manera genérica para referirse a camión verde, camión morado o microbús.

De manera general, un recorrido completo de una UTP es la siguiente: La unidad de transporte comienza en la parada asignada para que los pasajeros aborden. Después de que todos los pasajeros en la fila de espera abordaron, la unidad alcanza su capacidad máxima, o bien, después de un tiempo fijo en tal parada,

la unidad comienza su recorrido, en el que tendrá paradas de acuerdo con la demanda de usuarios. La unidad llega a otra terminal (terminal destino) donde realiza la última parada para aquellos pasajeros que ahí finalizan su viaje. Posteriormente, la UTP espera estacionada un determinado tiempo (tiempo en base) hasta que, de acuerdo con el programa de la línea, inicia un recorrido de regreso hasta la zona en donde inició. Al llegar nuevamente a la zona de inicio, la unidad descende pasajeros (si es que hay pasajeros a bordo), espera un determinado tiempo en base y finalmente regresa al sitio de salida para comenzar un nuevo recorrido.

De acuerdo con lo descrito en el párrafo anterior, se infiere que cada ruta de transporte requiere de un espacio físico para hacer la primera y última parada de su recorrido, así como un espacio para hacer base mientras inicia un nuevo recorrido. La Figura 4-6 ilustra la ubicación de puntos base y parada inicial de recorridos en CETRAM Universidad, además de dos estaciones de taxis: T1 y T2.

Observemos que la mayoría de las rutas tienen zona base muy cercana a la ubicación de la primera parada, sin embargo, algunas rutas con gran número de vehículos operando cuentan con dos o hasta tres zonas para hacer base. Por ejemplo, la ruta R76 hace base en dos puntos del paradero 6, delante y detrás de la ubicación de la primera parada de su recorrido. Las rutas R1.1, R95.1 y R60, generalmente tienen base sobre los paraderos 4 y 5, cuando las unidades no pueden ubicarse en esa región por falta de espacio, lo hacen a lo largo del paradero 5, entre los puntos M y N (ver Figura 4-6), por lo que, a veces, la fila de unidades formadas puede llegar hasta el punto O. De manera similar, la ruta R29.1 extiende su zona base hasta el punto L (ver Figura 4-6).

La estación de taxis T1 cuenta con infraestructura adecuada para que los usuarios aborden y desciendan de las unidades, mientras que T2 es una estación informal sin infraestructura. Las instalaciones de T1 tienen la capacidad para 5 taxis y cuando el cupo se llena en esta zona, las unidades que llegan se sitúan en la zona T2, formando una fila; una vez que las unidades salen de la estación T1 y liberan espacio, las unidades en T2 entran a T1 en el orden en que fueron llegando. Esta es la manera correcta de operar, pero muchas veces los operadores de taxis permiten a los pasajeros abordar desde la zona T2.

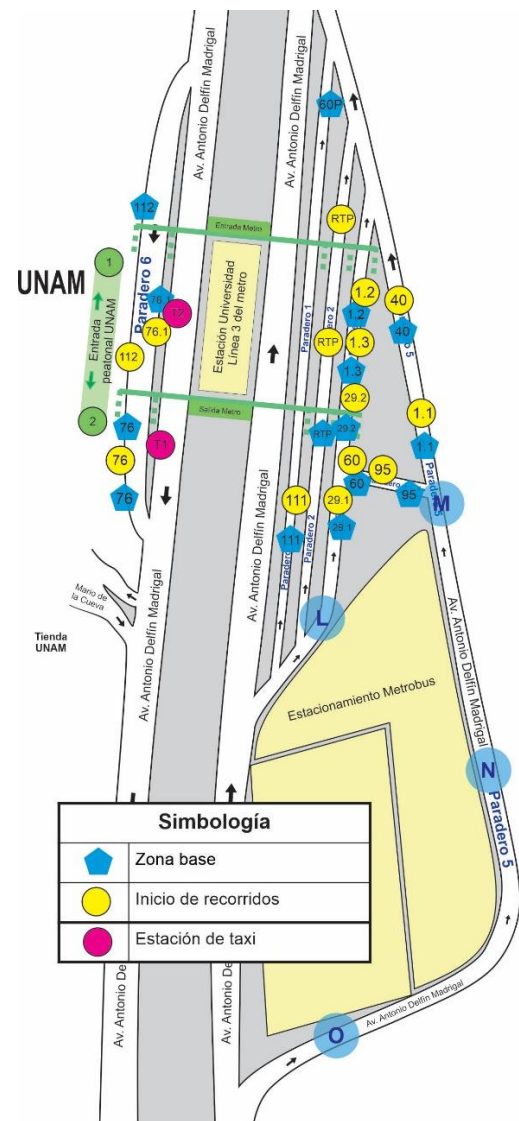


Figura 4-6 Zona base y parada inicial de recorridos de UTP en CETRAM Universidad.

Fuente: Elaboración propia (2020).

Como éste, hay varios casos en que los operadores de vehículos no respetan las señalizaciones o programas preestablecidos que indican la ubicación, tipo y tiempo de los movimientos que deben realizar para que los pasajeros asciendan o desciendan.



Respecto a la última parada de recorridos, en general no coinciden con la ubicación de la base o parada inicial. Un ejemplo de ello es la ruta R76.1 la cual realiza la última parada de recorrido sobre le punto R del paradero 2 (ver Figura 4-7, a), y cuya base e inicio de recorrido es en el paradero 6, en el otro extremo de la avenida. Esta manera de operar implica un recorrido sin pasajeros a bordo, entre la última parada y la zona base, como lo ilustra la Figura 4-7 (a). Situaciones similares de otras rutas se presentan e ilustran en la Tabla 4-3 y la Figura 4-7.

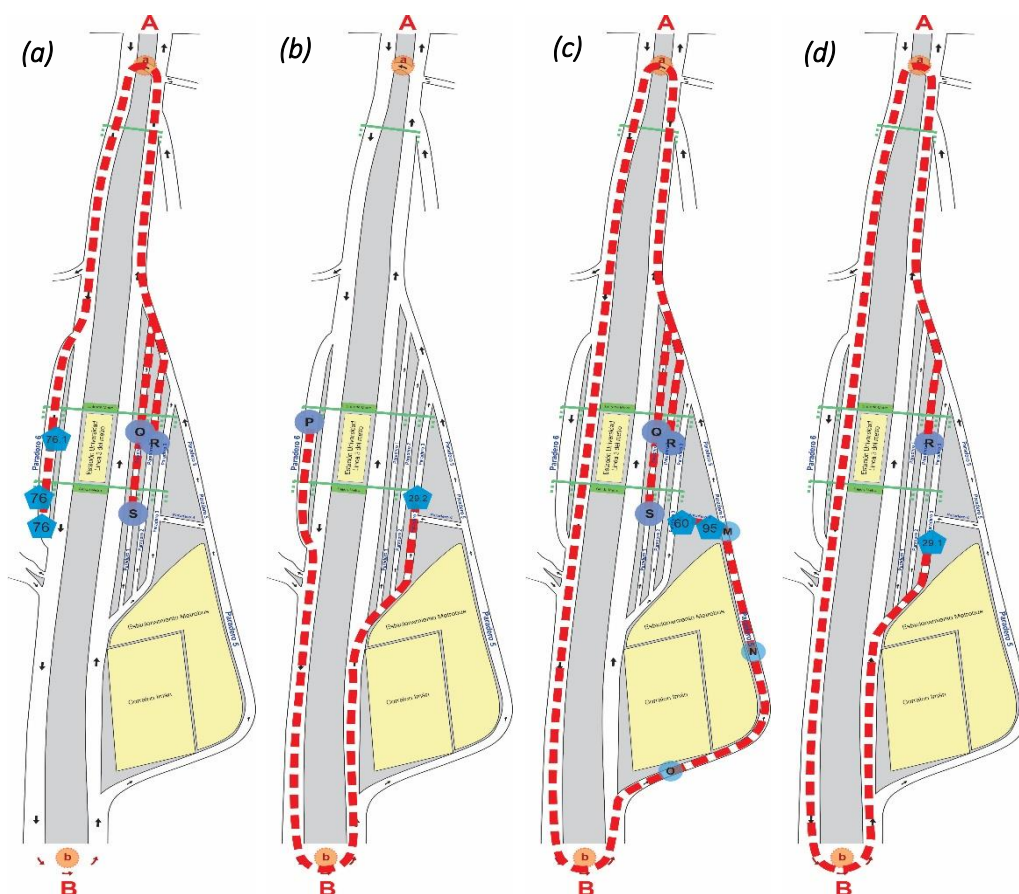


Figura 4-7 Recorrido desde la última parada hasta la zona base en rutas con estación terminal en CETRAM Universidad.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-3 Ubicación de base y parada final de algunas rutas con terminal en CETRAM Universidad.

Ruta	Paradero en donde se realiza la última parada.	Punto de ubicación de la última parada	Paradero de ubicación de la zona base.	Recorrido desde la última parada hasta la zona base Figura 4-7
76.1	Paradero 2	R	Paradero 6	(a)
76	Paradero 1	Q,S	Paradero 6	(a)
29.2	Paradero 6	P	Paradero 3	(b)
95	Paradero 1	R	Paradero 3	(c)
60	Paradero 1	Q,S	Paradero 4	(c)
29.1	Paradero 2	R	Paradero 3	(d)

Fuente: Elaboración propia (2020).

De acuerdo con información brindada por los operadores de la ruta R60, el recorrido c) (Figura 4-7) no debería realizarse, ya que la última parada debe ser entre los puntos M y N del paradero 5, sin embargo, algunos operadores de las unidades deciden realizarla entre S y Q del (paradero 1), principalmente por dos razones:

- Los operadores deciden salir del programa de la ruta y comenzar nuevos recorridos desde el paradero 1, evitando el tiempo de espera en la zona base, ya que, de acuerdo con el testimonio de los mismos operadores, se trata de aproximadamente 40 minutos y puede prolongarse hasta los 90 minutos.
- Dado que los operadores cuentan con bastante tiempo antes de iniciar un nuevo recorrido, no tienen inconveniente por realizar el recorrido extra (c).

Una consecuencia inmediata a esta situación es el aumento de flujo vehicular en ambos sentidos de Av. Antonio Delfín Madrigal, que en términos de movilidad no proporciona ningún beneficio ya que el recorrido es de unidades sin pasajeros.

Por otro lado, dentro de la programación de operación de la ruta R60, se contempla que una fracción de la flota de aproximadamente 20 unidades de transporte público debe descansar diariamente. Sin embargo, existen operadores que, a pesar de no estar dentro de la programación del día, deciden operar de manera independiente. A las UTP de la ruta R60 en esta situación se les conoce como *Unidades Pirata* (R60P). En este caso, la parada inicial y final del recorrido es en el paradero 1 y no en el paradero 5, (donde se encuentra la base de la ruta). El recorrido comienza sin pasajeros y es hasta la zona 4 que comienzan a abordar, lo que implica otro recorrido adicional sin pasajeros a bordo.

Además de la operación de las rutas antes mencionadas, en esta zona se observaron otras situaciones y movimientos importantes, las cuales se describen a continuación

- El tránsito de rutas con parada a los alrededores de la estación del metro, pero cuyas estaciones terminales no se encuentran en esta zona. Una ruta en este caso es la No. 45.
- La ruta R95.2 tiene zona base cerca del Paradero CETRAM Universidad, pero las paradas inicial y final de su recorrido, se sitúan fuera de la zona de estudio. Por las mañanas, entre 6:00 y 10:00 am, las UTP de esta ruta suelen situarse en el punto F (Figura 4-8) y después de las 10:00 am también utilizan el punto G. Su recorrido comienza en la calle Jecuite (saliendo de la zona 1) y finaliza por la calle Dalías (entrando nuevamente a la zona 1). Para alcanzar estas dos calles, las unidades deben transitar sobre Av. Delfín Madrigal, entre los retornos **a** y **b**.
- Una entrada vehicular a la UNAM se encuentra en el punto H y cerca del punto I se ubica la calle Mario de la Cueva que permite el egreso de vehículos desde distintos puntos de la Universidad. En este punto también se permite el acceso al centro comercial *Tienda UNAM*. Los puntos de acceso peatonal principal de Ciudad universitaria se encuentran al lado del paradero 6 (Figura 4-8).
- Vehículos particulares y taxis también realizan paradas en ambos sentidos de la Av. Antonio Delfín Madrigal, en los puntos J y K (Figura 4-8) con el objetivo de descender pasajeros. Generalmente de cada vehículo descienden de 1 a 3 pasajeros.



## 4.2.2 Descripción de la Zona 2

Esta zona es muy importante porque aquí se ubica la intersección de cuatro grandes vialidades (C1), dos bifurcaciones (D1 y D2) y el retorno *b*, del que se habló en la descripción de la zona 1 (Figura 4-9). El retorno *b* es considerado en esta zona debido a la cercanía física con respecto a el cruceo y las desviaciones. Sin embargo, su principal funcionalidad como vínculo entre los dos sentidos de tránsito sobre Av. Antonio Delfín Madrigal, ya fue descrita en la zona 1.

Las cuatro vialidades que se conectan entre sí en el cruceo C1 son: 1) Av. Antonio Delfín Madrigal, 2) Av. Del Imán, 3) Av. Chicomostoc<sup>11</sup> y 4) Av. Aztecas.

Las avenidas Antonio Delfín Madrigal y Del Imán integran gran parte de la región de estudio y forman parte de otras zonas (zonas 1,3 y 4). Mientras que Chicomostoc y Aztecas se pueden considerar solamente como vialidades de entrada y salida de vehículos, que se relacionan con la región de estudio únicamente en esta zona por medio del cruceo C1.

La Desviación 1<sup>12</sup> permite la conexión entre Av. Delfín Madrigal y Av. Del Imán, a partir del punto D1 (Figura 4-9). De manera similar, la Desviación 2<sup>13</sup> permite la conexión entre Av. Del Imán y Av. Chicomostoc, a partir de D2. Estas dos vialidades permiten a los vehículos pasar de una avenida a otra, sin necesidad de pasar por el cruceo C1, lo que agiliza su recorrido y evita los tiempos de espera generados por las señales de semáforos que coordinan los movimientos vehiculares en C1.

El tránsito de vehículos en el cruce C1 es controlado por un conjunto de semáforos que también regulan el flujo peatonal. El control y coordinación se determinan por cuatro fases que conforman el ciclo semafórico<sup>14</sup>, cuya duración es de 2:10 minutos.

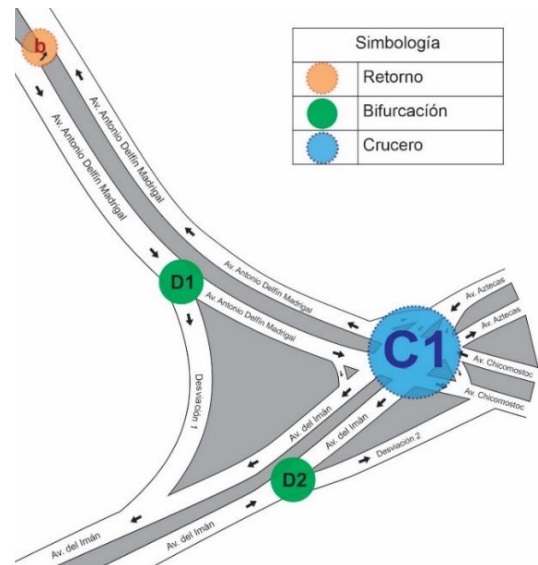


Figura 4-9 Zona 2 de la región de estudio.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

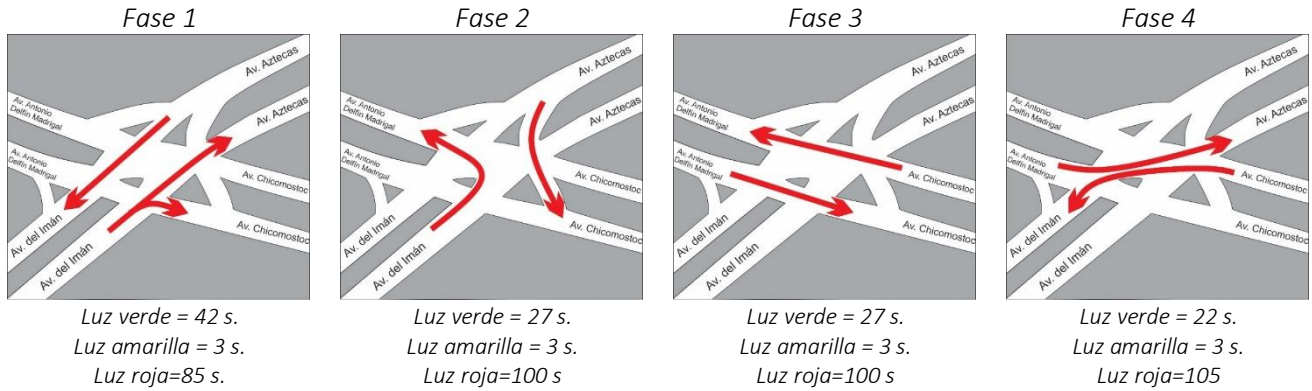
<sup>11</sup> El nombre oficial de esta vialidad es "Av. Del Imán", aunque también es reconocida como Chicomostoc e incluso existen letreros que muestran este último. En este trabajo se tomará como referencia el nombre "Chicomostoc", con el objetivo de diferenciar las vialidades 2 y 3 como dos diferentes en lugar de segmentos no alineados de la misma.

<sup>12</sup> No existe un nombre oficial para esta vialidad ni de manera física (con letreros) ni virtualmente (en mapas como Google Maps). Con el objetivo de poder hacer referencias específicas, en este trabajo se definió como "Desviación 1".

<sup>13</sup> Residentes ubican la vialidad con el nombre de "Imán", sin embargo, sobre la calle no existen letreros que le atribuyan tal nombre. Con el objetivo de diferenciar la calle de la Avenida principal "Del Imán", en este trabajo será referida como "Desviación 2".

<sup>14</sup> Un ciclo semafórico es el tiempo requerido para una secuencia completa de todas las fases (indicaciones) diferentes de señal del semáforo (Llanes, 2014)

Figura 4-10 Ciclo semafórico del cruceo C1 de la zona 2.



Fuente: Elaboración propia (2020).

Recordemos que el tiempo para que los vehículos circulen es determinado por luz verde. La luz amarilla y la roja indican *detenerse* y *alto total* respectivamente. En todos los semáforos de este cruce la luz amarilla se mantiene por 3 segundos, pero la duración de la luz verde y roja varía. En la Figura 4-10 se presentan las 4 fases indicando las duraciones de las luces verde y amarilla, entendido que la luz roja complementa la duración del ciclo.

A pesar del significado de la luz amarilla, se ha observado que los conductores utilizan el tiempo, tanto de la luz verde como el de la amarilla, para avanzar y atravesar el cruceo. La Figura 4-10 muestra la coordinación de flujo vehicular que debe existir, no obstante, el movimiento que en realidad se observa en las fases 1 y 3 son los que muestra la Figura 4-11; En la fase 3, los conductores que van desde Av. Chicomostoc hacia Av. Del Imán, conocen el siguiente momento de la semaforización y avanzan antes de lo que les corresponde, comenzando una fila en el centro del cruceo. De igual manera ocurre con los vehículos que van desde Av. Antonio Delfín Madrigal hasta Av. Aztecas. La situación es similar en la fase 1.

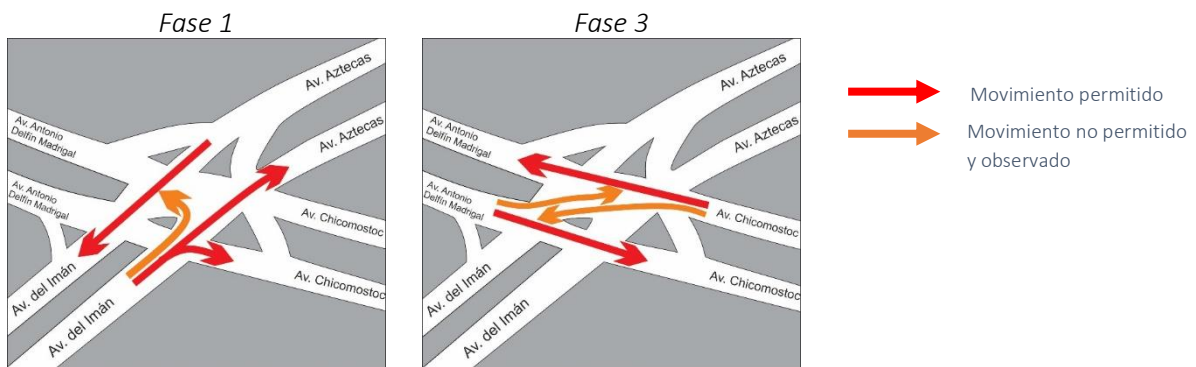


Figura 4-11 Funcionamiento real de las Fases 1 y 3 del ciclo semafórico en C1, Zona 2. Fuente: Elaboración propia (2020).

Otra de las situaciones que se presentan en esta zona corresponde a la instalación de un tianguis los jueves y viernes, a la desviación 2, que bloquea por completo el flujo vehicular desde el punto D2 (Figura 4-12). Los comerciantes comienzan a instalarse desde las 6:00 am y liberan por completo la calle aproximadamente hasta las 9:00 o 10:00 pm. Así que, prácticamente impiden el paso de vehículos durante todo el día.

Como una consecuencia directa a la instalación del tianguis se tiene el estacionamiento de vehículos, tanto de comerciantes como de clientes, en el área E (Figura 4-12), reduciendo 2 o 3 carriles de av Del Imán. Por otro lado, en el cruce, la cantidad de autos que circula desde B2 hacia Av. Chicomostoc, aumenta en comparación a los lunes, martes y miércoles en los que no existe el tianguis.

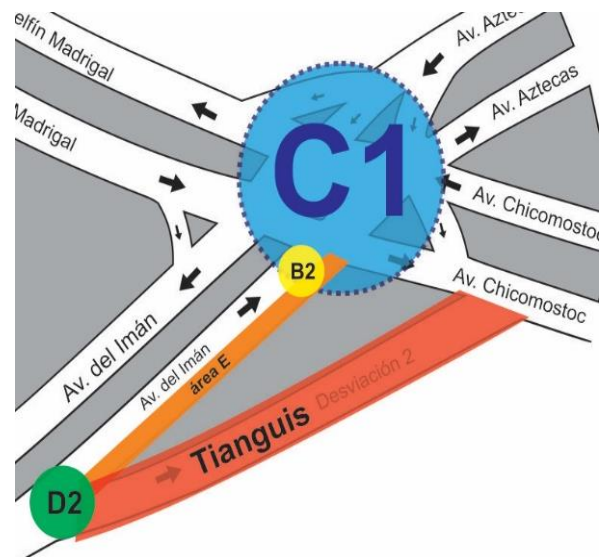


Figura 4-12 Ubicación de tianguis en la zona 2.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

#### 4.2.3 Descripción de la Zona 3

La zona 3 corresponde en gran parte a un segmento de Av. Del Imán, y a la calle Céfiro, la conexión principal entre Av. Del Imán y Blvd. Adolfo López Mateos. Los elementos más importantes sobre Av. Del Imán son dos retornos (e y d), y dos cruces (C2 y C3), cuya ubicación se muestra en la Figura 4-13, donde además se incluye el cruce C1 y el punto D2 (de la zona 2) como referencia a la conexión que hay entre las zonas 2 y 3.

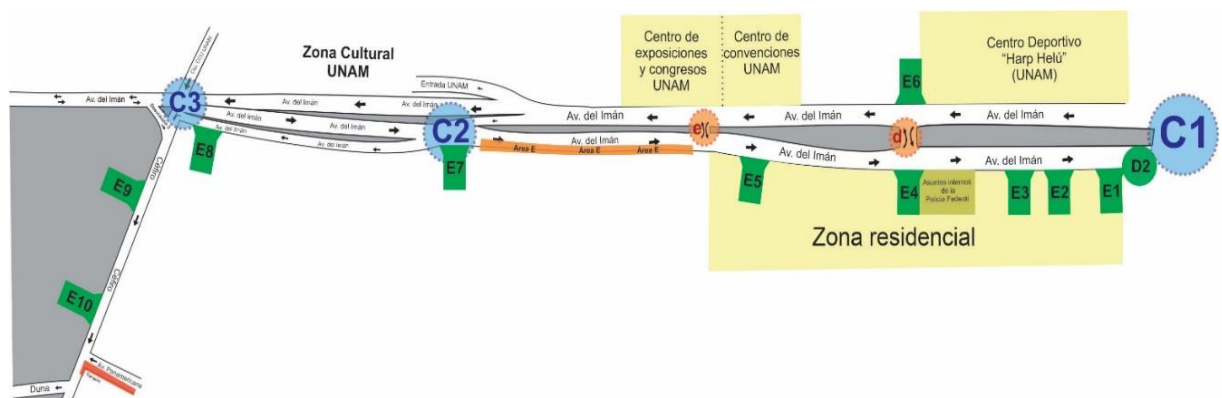


Figura 4-13 Zona 3 de la región de estudio.  
Fuente: Elaboración propia (2020).



A lo largo de esta zona se encuentran diez entradas/salidas privadas: ocho sobre Av. Del Imán (E1-E8) y dos sobre la calle Céfiro. Siete de ellas corresponden a zonas residenciales (E1-E5, E9 y E10) y el resto a instalaciones privadas de distintos tipos. Se ha observado que los movimientos de entrada/ salida de vehículos por los diez puntos son mínimos en comparación con el flujo vehicular de las calles y avenidas principales, razón por la que no serán estudiadas minuciosamente ni consideradas como puntos de entrada y salida de flujo vehicular en la región de estudio. Sin embargo, se consideró pertinente dar a conocer su existencia.

Cuatro instalaciones importantes, cuyo acceso es sobre Av. Del Imán, son: dos centros de exposiciones o convenciones y un centro deportivo pertenecientes a la UNAM, así como un edificio de oficinas de la Policía Federal. En los alrededores de estas instalaciones es común apreciar filas de autos que generalmente ocupan los carriles exteriores de ambos sentidos de la avenida. Cuando existen eventos en los centros de exposiciones y de congresos, se puede apreciar mayor movimiento en la zona, una gran cantidad de autos particulares, camiones y autobuses, tanto transitando como estacionados. Dichos eventos aumentan el flujo vehicular en toda la zona y, puntos como los retornos “d” y “e” son más utilizados en comparación a los días en que no hay eventos.

En la Figura 4-14, el punto G es una bifurcación sobre Av. Del Imán, que permite a los vehículos tomar tres direcciones:

- a) *Entrada a la zona cultural de la UNAM*  
Aunque esta es una entrada específicamente hacia la zona cultural, muchas personas la utilizan como un punto de acceso general a la universidad. En cualquier caso, los vehículos que toman esta dirección salen de la zona de estudio en cuestión.
- b) *Sobre Av. Del Imán en el mismo sentido.*  
En este caso los vehículos continúan sobre la misma vialidad, permaneciendo en la zona de estudio.
- c) *Sobre Av. Del Imán, dirección Céfiro.*  
Esta es una desviación anticipada que los vehículos toman para incorporarse a la Calle Céfiro. Deben atravesar el cruce C2 y transitar por Av. Del Imán hasta C3, pero sobre una ramificación de la avenida principal, como lo indica la línea punteada de la Figura 4-14.

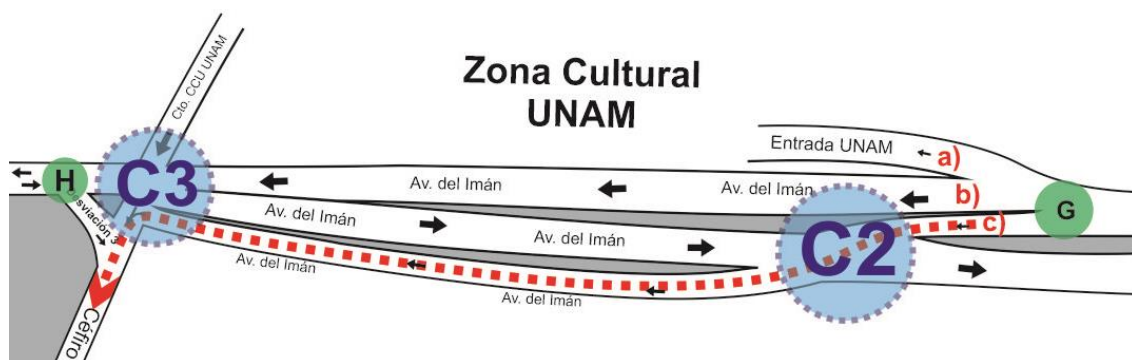


Figura 4-14 Cruceos en la Zona 3. Fuente: Elaboración propia (2020).

La separación del flujo vehicular en las direcciones b) y c) tienen como objetivo simplificar la coordinación semafórica de C3, cruce en el que no está permitido que vehículos sobre carriles principales de Av. Del Imán se incorporen a la calle Céfiro.

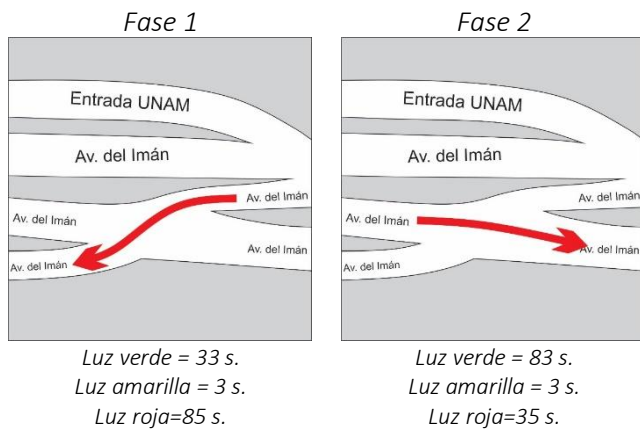
Para acceder a la calle céfiro, el flujo vehicular de Av. Del Imán procede de la siguiente manera:

- Dirección C2-C3, a partir del punto G, por la ramificación de Av. Del Imán.
- Dirección C3-C2, a partir del punto H, por la Desviación.

A partir de C3, fuera de esta zona, Av. Del Imán se vuelve estrecha, reduce el número de carriles y deja de haber separación por bordillos y aceras entre las dos direcciones.

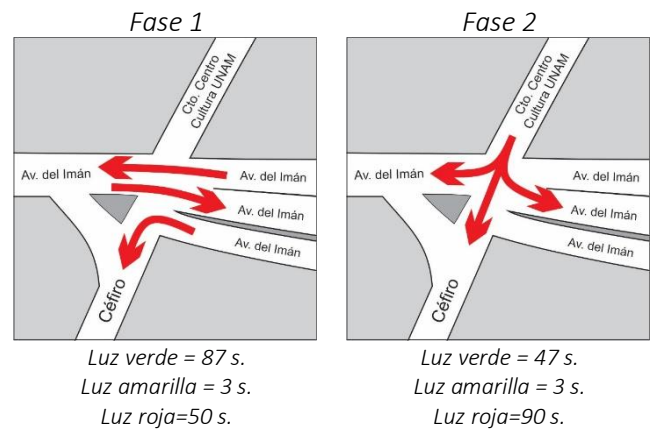
Los cruceos, C2 y C3 tienen control del flujo vehicular por medio de semáforos, cada uno de ellos con dos fases, cuya duración de ciclo es de 2:00 y 2:20 minutos respectivamente.

**Figura 4-15 Ciclo semafórico en el cruceo C2**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4-16 Ciclo semafórico en el cruceo C3**



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se ha observado que camiones y microbuses se estacionan sobre Av. Del Imán, a lo largo del área E, Figura 4-17. Los vehículos pertenecen a diversas rutas de transporte público y empresas privadas que transportan pasajeros a los eventos (cuando hay) que se realizan en los centros de exposiciones y congresos de la UNAM. Utilizan este espacio a lo largo del día, y aunque no siempre está totalmente ocupado, el carril exterior de la avenida regularmente no es transitado. A pesar de esto, no se han observado grandes problemas de congestión cerca del área.

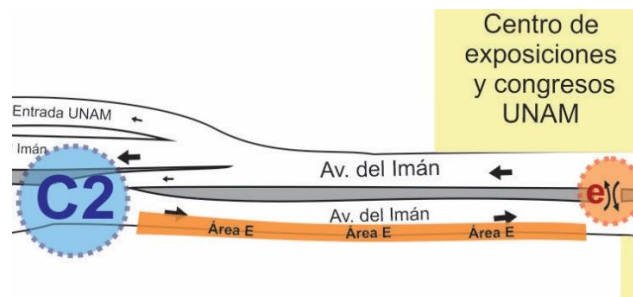


Figura 4-17 Área E, utilizada para el estacionamiento de camiones y microbuses de transporte público y privado.

Fuente: Elaboración propia (2020).



Por otro lado, al igual que en la zona 2, en esta zona se ubica un tianguis sobre Av. Panamericana (Figura 4-18), los lunes y miércoles. La instalación de los comerciantes comienza desde 6:00 am, permanece a lo largo del día y se retiran por la tarde. La diferencia es que, en esta zona no se bloquea completamente la avenida involucrada, solo reduce el espacio para el tránsito de vehículos, pero no tiene mayor impacto ya que el número de autos que acceden a Céfiro desde Av. Panamericana es pequeño.

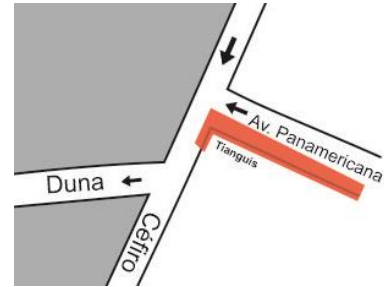


Figura 4-18 Ubicación de tianguis en la Zona 3, Av. Panamericana esquina con calle Céfiro. Fuente: Elaboración propia (2020).

#### 4.2.4 Descripción de la Zona 4

La zona 4 se encuentra estrechamente relacionada con las zonas 3 y 5, por lo que, para su descripción se hará referencia a elementos de tales zonas. Su principal característica es la conexión que permite entre Av. Del Imán y Blvd. Adolfo López Mateos por medio de las calles Céfiro, Duna, Ocaso, Alba, Crepúsculo y Selva (Figura 4-19), cuyas características principales se describen en la Tabla 4-4. La desviación 4, de la Zona 5, también ofrece dicha conexión, aunque, por lo general, esta vialidad la toman los vehículos que buscan incorporarse a Av. Insurgentes, desde el punto O, o aquellos que requieren realizar paradas sobre Av. Del Imán, entre los puntos O y M. La mayoría de los puntos de conexión (del G al O) son intersecciones del tipo T, en donde no existen semáforos que regulen la circulación de vehículos.



Figura 4-19 Zona 4 de la región de estudio. Fuente: Elaboración propia (2020).

A y B son puntos de entrada de flujo vehicular a la región de estudio, en la zona 4 mientras que C y D son puntos de salida. Los puntos de intersección que definen los cortes y delimitan la zona 4 **no** se consideran puntos de entrada o salida ya que, en estos casos, el flujo vehicular proviene o continua por vialidades de las zonas 3 o 5 (Figura 4-19). La gran cantidad de vehículos que entran a Blvd. Adolfo López Mateos por las calles Céfiro, Alba, Crepúsculo y los puntos A y B saturan los dos carriles disponibles y se origina congestión en esta zona disminuyendo en gran medida la velocidad de recorrido de los vehículos.

**Tabla 4-4 características generales de las calles que conectan Av. Del Imán y Blvd. Adolfo López Mateos en la Zona 4.**

Calle	Características
<b>Céfiro</b>	Es la principal alternativa que conecta Av. Del Imán con Blvd. Adolfo López Mateos, en un solo sentido. Es utilizada en gran medida por unidades de transporte público. Pero también por vehículos particulares y taxis.
<b>Duna</b>	<p>Es una desviación sobre Céfiro que a través de la calle Ocaso conduce hacia Av. Del Imán y Blvd. Adolfo López Mateos. Muchos vehículos que transitan por esta calle provienen de Av. Panamericana (Figura 4-19).</p> <p>Cuando existe congestión vehicular en el punto F (Figura 4-20), tanto vehículos particulares como unidades de transporte público que pretenden incorporarse a Blvd. Adolfo López Mateos, toman la calle Duna, seguida de Ocaso hasta la intersección C4 (Recorrido amarillo), como ruta alternativa a la calle Céfiro (Recorrido naranja).</p>
<b>Ocaso</b>	<p>Es principalmente utilizada por vehículos provenientes de la calle Duna (Figura 4-19).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La sección G-H la toman los vehículos con destino Av. Del Imán.</li> <li>▪ La sección H-C4 y G-C4 la toman vehículos con destino a Blvd. Adolfo López Mateos.</li> </ul>
<b>Alba</b>	Esta calle permite el tránsito en dos direcciones. Se ha observado que la conexión con Blvd. Adolfo López Mateos en el punto J es poco utilizado, es decir, pocos vehículos pasan sobre este punto. Mientras tanto, el punto I presenta mayor afluencia, principalmente por vehículos provenientes de la calle Duna.
<b>Crepúsculo</b>	Permite circular en una sola dirección (K-L) y es principalmente utilizada por vehículos particulares que transitan sobre Av. Del Imán en dirección (I-K). Es la segunda alternativa de conexión entre Av. Del Imán y Blvd. Adolfo López Mateos, después de Céfiro.
<b>Selva</b>	Permite la circulación en una sola dirección y es usualmente utilizada por vehículos particulares. El horario de mayor utilización es de 6:00 a 08:30, que coincide con la hora de entrada tanto de la primaria como de la secundaria, cuyas entradas se sitúan a lo largo de la calle.

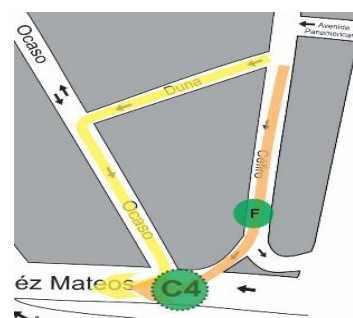


Figura 4-20 Alternativa para llegar a Blvd. Adolfo López Mateos desde calle Céfiro.

Fuente: Elaboración propia (2020).

Algunas situaciones que se han observado en esta zona son las siguientes:

- Unidades de transporte público como camiones y autobuses **no** transitan por calle Selva, Crepúsculo, Alba, Ocaso (entre Alba y Duna) y Av. Del Imán (hacia Av. Insurgentes, Figura 4-21).
- Unidades de transporte público como camiones y autobuses transitan sobre Av. Del Imán, pero únicamente en dirección B-A (Figura 4-21).
- Vagonetas de la ruta R76.1, con base en la Zona 1, transitan por calle Selva y Av. Del Imán en ambos sentidos.
- Cuando los vehículos tardan en incorporarse a Blvd. Adolfo López Mateos desde la calle Crepúsculo (Punto L, Figura 4-22), se crea una cola a lo largo de la calle, que en ocasiones se prolonga hasta el punto T. En esta situación, las vagonetas de la ruta R76.1 y algunos vehículos particulares que circulan por Av. Del Imán (Dirección I-K, Figura 4-22), retornan en el punto K y continúan por Alba o Céfiro.



Figura 4-21 Calles de la zona 4 por donde no transitan camiones ni autobuses.

Fuente: elaboración propia (2020).

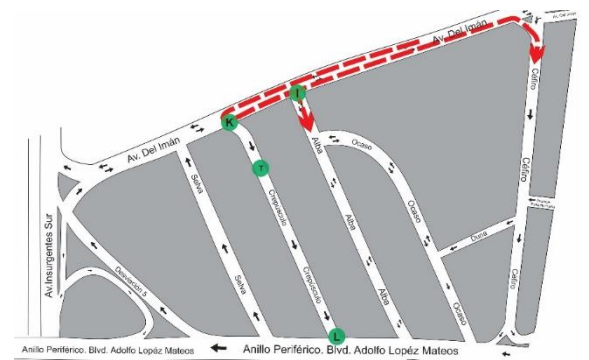


Figura 4-22 Movimiento alternativo en situación de congestión vehicular sobre la calle Crepúsculo.

Fuente: Elaboración propia (2020).

En esta zona también se ubican distintas instituciones públicas y gubernamentales que provocan movimiento tanto peatonal como vehicular a sus alrededores. A continuación, se presenta un listado de las instituciones que más sobresalen, así como las situaciones y movimientos que se han observado a sus alrededores. Cabe mencionar las figuras se presentan únicamente a manera de ilustración, con el objetivo de mostrar una aproximación de los puntos de entrada y no las proporciones reales del área correspondiente a cada institución.

**1. Servicio Nacional de Sanidad Innovación y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) y Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) (Figura 4-23).**

- ✓ Son instalaciones de oficinas dedicadas a la administración de ambas secretarías.
- ✓ Esporádicamente se han observado vehículos particulares y unidades de transporte público haciendo paradas Sobre Blvd. Adolfo López Mateos, (Punto S1, Figura 4-23).
- ✓ La entrada/salida al estacionamiento de las instalaciones se ubica en el punto S2. Ambas entradas propician congestión vehicular en calle crepúsculo y Adolfo López Mateos.

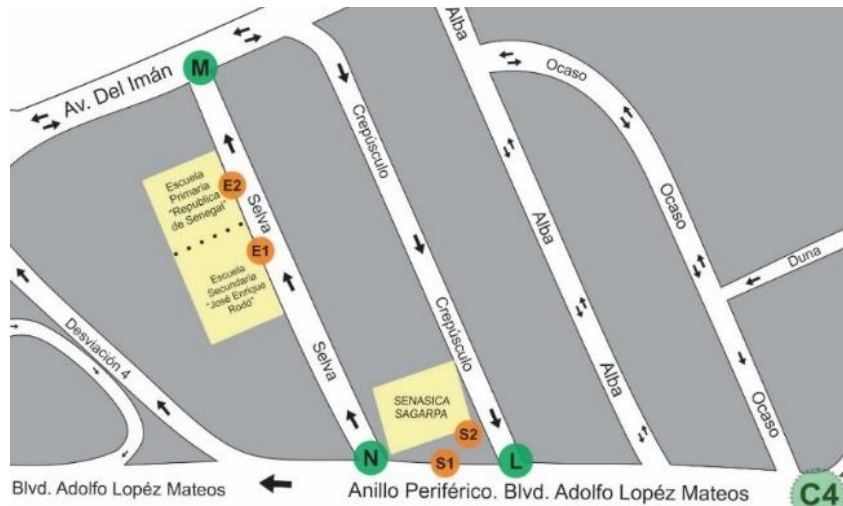


Figura 4-23 Ubicación de escuelas y oficinas de SENASICA y SAGARPA en la Zona 4.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

## 2. Escuela Secundaria Diurna N° 139 “José Enrique Rodó” (Figura 4-23)

- ✓ Aumenta el flujo vehicular y congestión alrededor de la entrada E1.
- ✓ Para descender a los estudiantes, muchos vehículos particulares se estacionan en doble fila a lo largo de calle Selva, sobre Av. Imán (Punto M). y en menor medida sobre Adolfo López Mateos (Punto N).
- ✓ Estudiantes que acuden a la escuela en transporte público solicitan paradas cercanas a la entrada de su escuela (Puntos M y N).
- ✓ Algunos vecinos utilizan la calle en sentido contrario.
- ✓ Taxis y vehículos particulares que descenden estudiantes en la intersección de Av. Del Imán y Selva, continúan su recorrido retornando, como se muestra en la Figura 4-24
- ✓ El horario en que se pueden apreciar este tipo de movimientos es de 6:30 a 7:30 am.

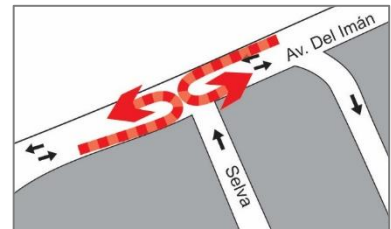


Figura 4-24 Movimiento de retorno en la intersección Av. del Imán y calle Selva.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

## 3. Escuela Primaria Pública “Republica de Senegal” (Figura 4-23)

- ✓ Aumenta el flujo vehicular y congestión alrededor de la entrada (Punto E2).
- ✓ Para descender a los estudiantes, muchos vehículos particulares se estacionan en doble fila a lo largo de calle Selva, sobre Av. Imán (Punto M) y, en menor medida sobre Adolfo López Mateos (Punto N).
- ✓ A diferencia de la Escuela Secundaria, los padres de familia acompañan a los estudiantes hasta la entrada de la escuela, prolongando el tiempo de estacionamiento (10 min, o más).
- ✓ Estudiantes que acuden a la escuela en transporte público solicitan paradas cercanas a la estrada de su escuela (Puntos M, N).

- ✓ Vagonetas de transporte escolar se estacionan cerca de E2. El operador debe acompañar a los alumnos hasta la entrada, lo que le toma alrededor de 5 minutos. Esto genera congestión o bloqueos absolutos de la calle.
- ✓ Taxis y vehículos particulares que descienden estudiantes en la intersección de Av. Del Imán y Selva (punto M), continúan su recorrido retornando en tal punto (Figura 4-24).
- ✓ Aún después del horario de entrada (08:00- 8:15:00), se puede observar a padres de familia conversando fuera de las instalaciones mientras tienen sus autos estacionados sobre la calle Selva.
- ✓ El horario en que se pueden apreciar este tipo de movimientos es de 7:30 a 8:30 am.

#### 4. Preescolar CENDI<sup>15</sup> N.28 Bertha Von Glumer (Figura 4-25)

- ✓ Aumenta el flujo vehicular y congestión alrededor de la entrada (Punto E3).
- ✓ Por tratarse de niñas y niños pequeños, los padres deben conducirlos hasta la entrada de las instalaciones y para quienes asisten en vehículos particulares implica estacionarse por lapsos de hasta 5, 10 ,15 y hasta 20 minutos. La fila de vehículos particulares bloquea un carril de Av. Imán (desde el punto O hasta el punto E3).
- ✓ Padres de familia que utilizan transporte público, solicitan paradas cercanas a la entrada, sobre Av. Del Imán, entre los puntos O y M.
- ✓ El horario en que se pueden apreciar este tipo de movimientos es de 7:00 a 9:00 am.

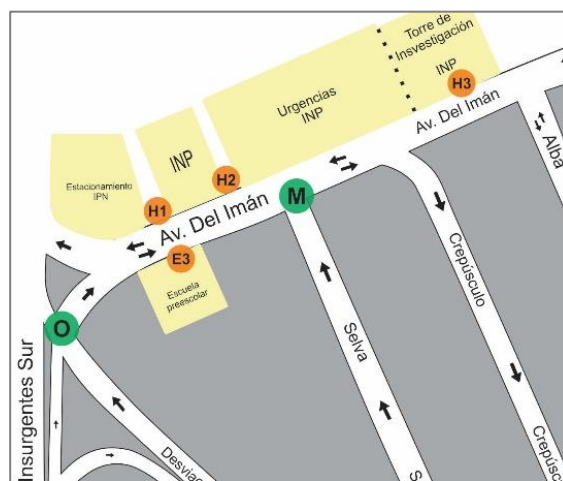


Figura 4-25 Ubicación de CENDI y INP en Zona 4.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

#### 5. Instituto Nacional de Pediatría (Figura 4-25)

- ✓ Aunque la entrada peatonal principal se encuentra sobre Av. Insurgentes, gran parte de las personas que acuden a estas instalaciones descienden de vehículos particulares y unidades de transporte público sobre Av. Del Imán. Entre los puntos O y M.
- ✓ Los vehículos que llegan desde Blvd. Adolfo López Mateos, utilizan la calle Selva para aproximarse a las instalaciones.
- ✓ La salida vehicular del estacionamiento se ubica sobre Av. Del Imán en el punto H1.
- ✓ La entrada/salida vehicular y peatonal a la zona de urgencias se ubica en el punto H2.
- ✓ La entrada peatonal a la torre de investigación es sobre Av. Del Imán en H3.
- ✓ Este tipo de situaciones y movimiento puede observarse durante todo el día.

Aunque la descripción de estas instituciones se realizó individualmente, debemos tener en mente que las situaciones y movimientos que se generan a sus alrededores suceden de manera simultánea en algunos horarios. A lo largo del día, después de 10:00 am, se pueden observar situaciones similares en

<sup>15</sup> CENDI (Centro de desarrollo infantil). Los CENDI-Preescolar proporcionan servicios educativos y asistenciales a niñas y niños desde temprana edad, hasta aproximadamente 6 años.

los horarios de salida de las escuelas, o bien, a otros horarios de entrada. Pero, recordemos que el horario de interés para este trabajo es de 07:00 a 10:00 am.

Por otro lado, existen cuatro rutas de transporte público que tienen base en esta zona; dos sobre Av. Del Imán y dos al final de la calle Céfiro. Las dos rutas con base sobre Av. Del Imán tienen estación terminal en CETRAM Taxqueña<sup>16</sup>, fuera de la región de estudio. Para distinguirlas de las rutas con estación terminal en CETRAM Universidad, de la zona 1, se utilizará la nomenclatura RX.T. donde X es el número de la ruta y la "T" después del punto hace referencia al CETRAM Taxqueña. La ubicación de la base y parada inicial del recorrido de cada ruta se ilustran en la Figura 4-26. Sobre Av. Del imán también existe una estación de Taxis (Punto T, Figura 4-26), en donde se ha observado hasta 6 unidades estacionadas esperando pasajeros, lo que provoca el bloqueo en uno de los carriles de la avenida.

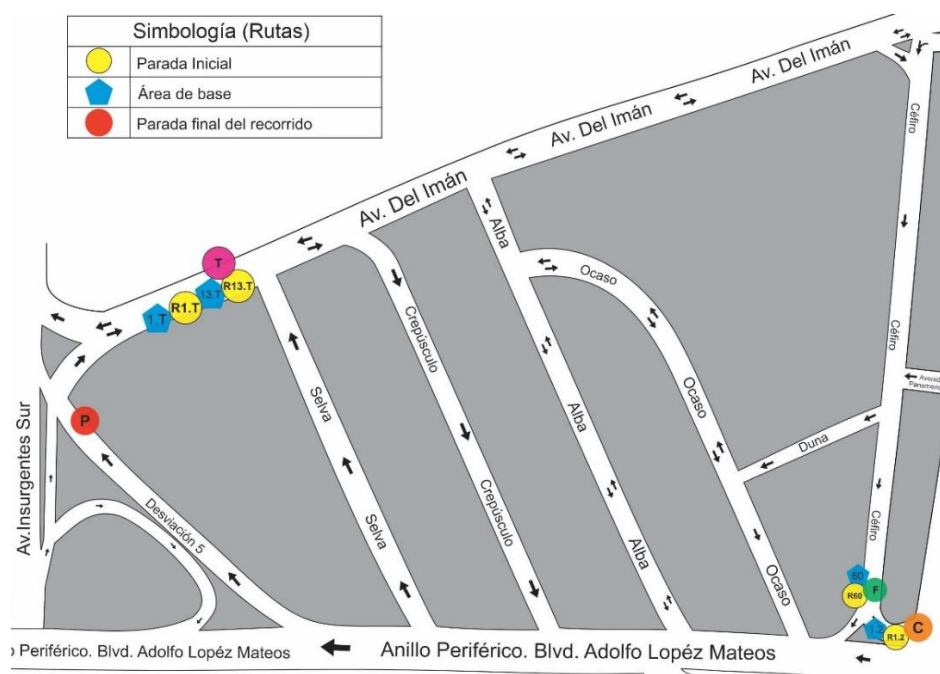


Figura 4-26 Ubicación del paradero de 4 rutas en la zona 4. Fuente: Elaboración propia (2020).

La base y parada inicial de la ruta R60, (al final de calle Céfiro) son utilizadas únicamente por *unidades pirata* (de las que se habló en la descripción de la Zona 1). Estas unidades comienzan su recorrido sin pasajeros en CETRAM Universidad, y es hasta calle Céfiro que realizan la primera parada destinada al abordaje de pasajeros. Por esta razón, dicha parada es considerada **intermedia** para el recorrido de la unidad e **inicial** para el recorrido de pasajeros. La salida de las unidades pirata y la primera parada son coordinadas por dos despachadores, uno en CETRAM Universidad y otro en calle Céfiro. Las *unidades piratas* tienen un intervalo de salida de 4 minutos en CETRAM Universidad, mismo tiempo que permanecen en la parada de Céfiro y tras la llegada de otra unidad pirata a dicha parada, la unidad que ha cargado pasajeros continúa con su recorrido hacia Blvd. Adolfo López Mateos. Con esta manera de operar se pretende que en todo momento

<sup>16</sup> CETRAM Taxqueña está ubicado al sur de la CDMX, en la delegación de Coyoacán, pero no pertenece a la región de estudio de este trabajo.



exista una unidad pirata disponible para que los pasajeros aborden. Sin embargo, en varias ocasiones se ha observado más de una unidad estacionada y haciendo fila para ser abordada.

Por otro lado, las unidades de la ruta R1.2 suelen hacer base sobre el retorno que conduce al punto C (Figura 4-26). Generalmente se pueden observar de 1 a 3 unidades, pero cuando se acumulan más de 3, las últimas de la fila obstruyen el flujo vehicular sobre Céfiro, aumentando el congestionamiento el punto F (Figura 4-26), ya que unidades de otras rutas también utilizan la ubicación como parada, destinada al ascenso y descenso de pasajeros.

Aunque el tiempo de parada de las otras rutas por lo general es menor a 1 minuto, el número de unidades transitando cerca del punto F puede exceder a 10. En esta situación es cuando vehículos particulares como otras unidades de transporte público deciden tomar la ruta alternativa por las calles Duna y Ocaso.

En cuanto a las rutas R1.T y R13.T, coinciden en el recorrido que realizan dentro de la región de estudio. Por lo que, a manera de simplificación, en este trabajo serán ocasionalmente consideradas como una sola ruta “RT”, puesto que, además, la zona base y el punto de inicio de recorridos se encuentran muy cercanos (ver Figura 4-27). Otra característica en común es que la última parada de sus recorridos, antes de llegar a base, es sobre la Desviación 5 de la Zona 5, en el punto P (Figura 4-27).

En resumen, la Tabla 4-5 presenta las características generales de las cuatro rutas con base en la zona 4 indicando el tipo de unidades con las que opera, de acuerdo con la clasificación presentada en la Descripción de la Zona 1 (pág. 48).

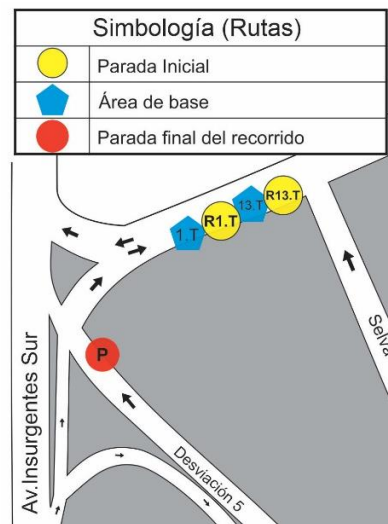


Figura 4-27 Paradero de rutas en Av. Del Imán, Zona 4.

Fuente: Elaboración propia (2020).

Tabla 4-5 Características de rutas con base en la Zona 4

Ruta	Líneas diferentes	Ubicación de las dos estaciones terminales de las rutas		Tipo de unidades operando
		Fuera de la Zona 4	Dentro de la Zona 4	
R1.2	1	Zona 1: CETRAM Universidad	Zona 4: Calle Céfiro	CM
R60P	1	Zona 1: CETRAM Universidad	Parada-Base intermedia: Calle Céfiro Terminal fuera de la región de estudio	CV
R1.T	1	Fuera de la región de estudio: CETRAM Taxqueña	Zona 4: Av. Del Imán	CM
R13.T	4	Fuera de la región de estudio: CETRAM Taxqueña y Otro	Zona 4: Av. Del Imán	CV, CM, M

. Fuente: Elaboración propia (2020).

Además de las rutas con base en los CETRAN Universidad y Taxqueña, por Blvd, Adolfo López Mateos transitan otras rutas (Tabla 4-6), de las cuales no se presenta mayor detalle respecto a su recorrido completo ya que no tienen ninguna estación terminal dentro de la región de estudio y la única conexión con la región de estudio es sobre Blvd. Adolfo López Mateos, en las zonas 4 y 5.

**Tabla 4-6 Características de rutas que transitan por Blvd. Adolfo López Mateos y no tienen ninguna estación terminal dentro de la región de estudio.**

Ruta	Líneas diferentes	Ubicación de las dos estaciones terminales de las rutas		Tipo de unidades operando	Otras características
		Origen	Destino		
COPESA	1	Canal de Chalco	Toreo de 4 Caminos	CV	Las unidades no muestran un número de ruta, solo el destino de la línea. No realizan parada en la zona 4 pero si en la zona 5.
	2		Tacubaya		
	3		Barranca del Muerto		
39	1	Estadio Azteca	Santo Tomas Ajusco	CV	Realizan una parada en la zona 4 y otra en la zona 5.
RTP 57A	1	Metro constitución de 1917	Metro Cuatro Caminos	RTP	Solo realiza parada en la zona 5.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.5 Descripción de la Zona 5

La Zona 5 se encuentra estrechamente relacionada con la Zona 4 y algunos de sus elementos ya se han comentado en descripciones previas. Parte de la Zona 5 corresponde a la infraestructura que permite la conexión entre Av. Insurgentes y Blvd. Adolfo López Mateos, este último forma parte del Anillo Periférico, una de las principales vialidades del Valle de México, que además delimita las fronteras de las delegaciones Coyoacán y Tlalpan (Figura 4-28).

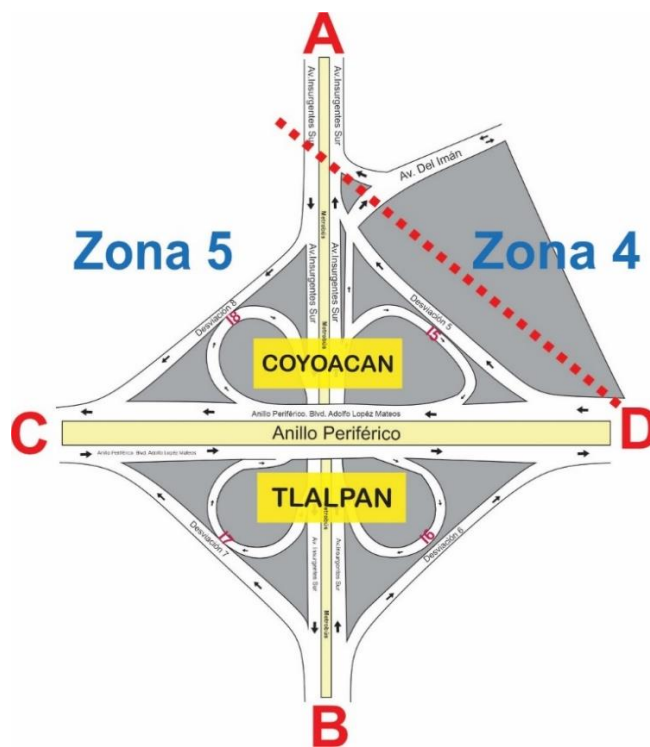


Figura 4-28 Intercambiador vial entre Av. Insurgentes sur y Blvd. Adolfo López Mateos. Fuente: Elaboración propia.



Cabe señalar que la sección del anillo Periférico tiene tres componentes importantes:

1. Carriles exteriores que permiten la conexión con Av. Insurgentes. Estos son los carriles a los que nos referiremos a lo largo de esta descripción y para los cuales se utiliza el nombre Blvd. Adolfo López Mateos<sup>17</sup> (Figura 4-28).
2. Carriles centrales al mismo nivel que los carriles exteriores (Primer nivel). Los puntos de acceso y salida a estos carriles se encuentran fuera de la región de estudio, por lo tanto, el flujo vehicular que transita por ellos no interactúa con el flujo de los carriles exteriores, razón por la que no son de interés para este trabajo.
3. Carriles centrales del segundo piso. Al igual que los carriles centrales del primer piso, tienen acceso y salida fuera de la zona de estudio y el flujo vehicular es independiente del de carriles exteriores.

Por otro lado, entre ambas direcciones de Av. Insurgentes existen dos carriles exclusivos al tránsito de unidades Metrobús. Debido a esto y al gran flujo vehicular que transita por ambos sentidos de la avenida y el boulevard, la conexión no es por medio de un simple cruce como los que se han mencionado en las zonas 2 y 3, sino que, en este caso existe un intercambiador vial de dos niveles y con ocho elementos de conexión, los cuales se presentan en la Tabla 4-7 (ver Figura 4-28). Av. Insurgentes permanece en un solo nivel, mientras que Blvd. Adolfo López Mateos se eleva sobre Av. Insurgentes a lo largo de la intersección.

**Tabla 4-7 Elementos de conexión del intercambiador vial entre Av. Insurgentes Sur y Blvd. Adolfo López Mateos.**

Nombre <sup>18</sup>	Conexión	
	Desde	Hacia
Desviación 5	Blvd. Adolfo López Mateos (Dirección D-C)	Av. Insurgentes (Dirección B-A)
Desviación 6	Av. Insurgentes (Dirección B-A)	Blvd. Adolfo López Mateos (Dirección C-D)
Desviación 7	Blvd. Adolfo López Mateos (Dirección C-D)	Av. Insurgentes (Dirección A-B)
Desviación 8	Av. Insurgentes (Dirección A-B)	Blvd. Adolfo López Mateos (Dirección D-C)
Incorporación 15	Av. Insurgentes (Dirección B-A)	Blvd. Adolfo López Mateos (Dirección D-C)
Incorporación 16	Blvd. Adolfo López Mateos (Dirección C-D)	Av. Insurgentes (Dirección B-A)
Incorporación 17	Av. Insurgentes (Dirección A-B)	Blvd. Adolfo López Mateos (Dirección C-D)
Incorporación 18	Blvd. Adolfo López Mateos (Dirección D-C)	Av. Insurgentes (Dirección A-B)

Fuente: Elaboración propia (2020).

<sup>17</sup> El Anillo Periférico recibe diferentes nombres a lo largo de su recorrido, debido a que atraviesa diversas delegaciones de la CDMX y parte del Estado de México. El nombre “Blvd. Adolfo López Mateos” se ha observado en letreros sobre la vialidad, y coincide con el nombre definido en Google Maps.

<sup>18</sup> Los nombres de los elementos del intercambiador vial han sido establecidos de acuerdo a la Figura 4-28 con el objetivo de realizar referencias unificadas a lo largo de este trabajo. Oficialmente, en las vialidades no existen letreros físicos que indiquen un nombre, tampoco existen en mapas en línea de Google Maps. La numeración utilizada para los nombres está en correspondencia a la utilizada en la descripción del resto de la región de estudio.

En cuanto a los puntos de entrada y salida del flujo vehicular en esta zona, es relevante mencionar lo siguiente:

- El flujo vehicular que accede por H, proviene desde los puntos R, S y T (ver Figura 4-29).
- Los puntos F y G (Figura 4-29) son puntos de salida del flujo vehicular, tanto de la zona 5 como de la región de estudio en general.
- Los puntos I y J (Figura 4-29) son puntos de entrada/salida para la zona 5, pero no para la región de estudio, ya que cuando los vehículos transitan sobre dichos puntos, pasan de la zona 4 a la 5, o viceversa, pero en ambos casos se mantienen dentro de la región de estudio.

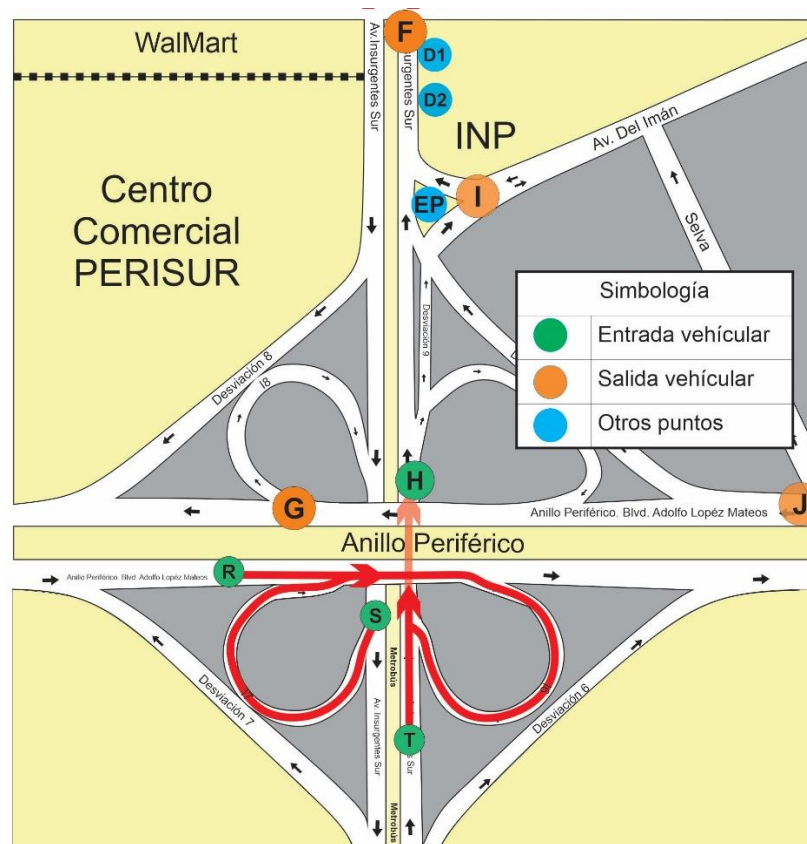


Figura 4-29 Puntos importantes de la zona 5  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Es preciso mencionar que Av. Insurgentes Sur, dirección F-H, no pertenece a la zona de estudio, pero se considera en la ilustración, ya que, a un costado de ella se ubica el centro comercial Perisur, y un establecimiento de la tienda departamental Walmart (Sucursal Periférico Sur, ver Figura 4-29), los cuales atraen a un gran número de personas, tanto trabajadores como clientes y consumidores. Por otra parte, en Av. Insurgentes Sur dirección H-F, se ubican la entrada peatonal y vehicular al INP (Puntos D1 y D2, Figura 4-29) y en EP existe la estación de policía “Insurgentes Sur”. Razón por la que constantemente pueden verse patrullas y otros vehículos de policía estacionadas cerca del módulo.

Otro de los elementos importantes en la Zona es la estación Perisur de la línea 1 del Metrobús, cuyo recorrido completo es sobre Av. Insurgentes. La ubicación de la estación, dentro de la zona 5 se ilustra en la Figura 4-30 cuenta con dos puntos de acceso: E1 y E2. La entrada E1 conduce hacia un puente peatonal con entrada/salida en ambos lados de Av. Insurgentes. Mientras que E2 conduce hacia el paradero de UTP, sobre Blvd. Adolfo López Mateos, el cual, es conocido como *Paradero Perisur*.



Figura 4-30 Estación Perisur del Metrobús y paraderos de UTP en la Zona 5.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

El paradero Perisur, además de ser utilizado por unidades de transporte público, también es aprovechado por taxis y vehículos particulares que abordan y descienden pasajeros, muchos de ellos con origen o destino hacia la estación del Metrobús. Aunque la mayoría de los vehículos pretenden estacionarse en el carril exterior, lo más cercano posible al punto E (ver Figura 4-30) muchas veces no pueden hacerlo, debido al gran número de vehículos en la zona, entonces se expanden por toda la región color verde que se ilustra en la Figura 4-30 cuya longitud es de aproximadamente 150 metros.

Con frecuencia es posible observar todo tipo de vehículos estacionados en doble fila, los cuales, en conjunto con las unidades de transporte público disminuyen el espacio para la circulación y en ocasiones provocan el bloqueo absoluto de la vialidad. Esta situación se ve reflejada principalmente en Blvd. Adolfo López Mateos (desde la zona 4) y en la incorporación I5, la cual, a su vez, afecta el flujo que entra desde el Punto H en Av. Insurgentes (Figura 4-30)

Otras situaciones particulares que se han observado en este paradero son las siguientes:

- ✓ La mayoría de las rutas que inician recorrido en CETRAM Universidad y transitan sobre Blvd. Adolfo López Mateos realizan parada.
- ✓ Las rutas que se integran a la región de estudio en la zona 4 no siempre realizan parada.
- ✓ No existe un punto fijo destinado a la parada de cada ruta, esto ocasiona tres cosas:
  1. Las unidades realizan parada en cualquier punto a lo largo del paradero y si en el momento que llegan no existe espacio libre en el carril derecho, se estacionan en doble fila sobre la vialidad.
  2. Existen pasajeros esperando para abordar a lo largo de todo el paradero.
  3. Gran parte de las unidades de transporte público realizan 2 o hasta 3 paradas a lo largo del paradero, la primera para descenso; la segunda y tercera para abordaje de pasajeros.
- ✓ Después de descender pasajeros que solicitan la parada y abordar a aquellos que esperaban la ruta, las unidades de transporte público esperan por más pasajeros, prolongando el tiempo de parada.
- ✓ Unidades piratas de la ruta R60 utilizan el espacio hasta por 5 minutos, con el objetivo de cargar el mayor número de pasajeros posible. Esta situación se vuelve menos frecuente con la presencia de policías de tránsito, pero ellos no siempre están.
- ✓ El ascenso y descenso de pasajeros es más rápido en taxis que en vehículos particulares ya que los conductores de vehículos particulares suelen tomar tiempo para despedirse/saludar de manera especial a las personas que descienden/abordan.
- ✓ Vehículos particulares esperan demasiado tiempo por la llegada de sus familiares.
- ✓ Taxis utilizan el paradero como base y suelen esperar por pasajeros hasta por 5 o 10 minutos
- ✓ Existen varios puestos de comida a lo largo del paradero.

Como podemos darnos cuenta, son muchos los factores que influyen en la causa del congestionamiento que se crea tanto en la zona 5 como en la zona 4. Pero se considera que muchos de estos factores están relacionados a la manera de operar y al gran número de unidades de transporte público que transitan por la zona. Esta consideración se fundamenta en la situación previamente descrita respecto al paradero Perisur, pero situaciones similares se presentan sobre las desviaciones 5 y 9 y cerca de la estación de policía (Punto M, Figura 4-30)

En el punto M, muchas unidades de transporte público realizan parada para el ascenso y descenso de pasajeros. Todas corresponden a rutas que se dirigen hacia CETRAM Universidad y que ingresaron a la zona 5 a través del punto H. Al igual que en el paradero Perisur, aquí, las unidades constantemente realizan más de una parada, la mayoría sobre el punto M, pero pueden comenzar desde la desviación 9 y hasta el punto N sobre Av. Del Imán (Figura 4-30)

Unidades de las rutas RT también transitan por el punto M, pero estas no hacen parada en tal punto, ya que la última parada de su recorrido la realizan sobre el punto P de la desviación 5 y la parada inicial del siguiente recorrido es en el punto N. Esto quiere decir que las unidades transitan vacías entre los puntos P y N. Pero el tránsito de unidades de transporte público en general (vacías o con pasajeros), así como todo tipo de paradas que realizan dan origen a varios puntos de congestionamiento cuyo impacto se ve reflejado principalmente en Blvd. Adolfo López Mateos, Av. Insurgentes (dirección B-A) y la desviación 5.

### 4.3 Operación de las rutas de transporte público

Ahora que se ha presentado una descripción detallada de cada una de las zonas, fijemos nuestra atención a los recorridos que realizan las rutas de transporte público con una o dos paradas terminales dentro de la región de estudio.

La Figura 4-31 es una representación de las cinco zonas de la región de estudio en conjunto. Mantiene en gran medida las dimensiones reales, sin embargo, debido a su forma y tamaño resulta difícil observar los nombres de las vialidades y es poco adecuada para ilustrar los recorridos. Por esta razón se diseñó un bosquejo simple que conserva las relaciones de conexión y el sentido de tránsito vehicular entre calles y avenidas, pero que no conserva magnitudes como distancia y ángulos de intersección (Figura 4-32).

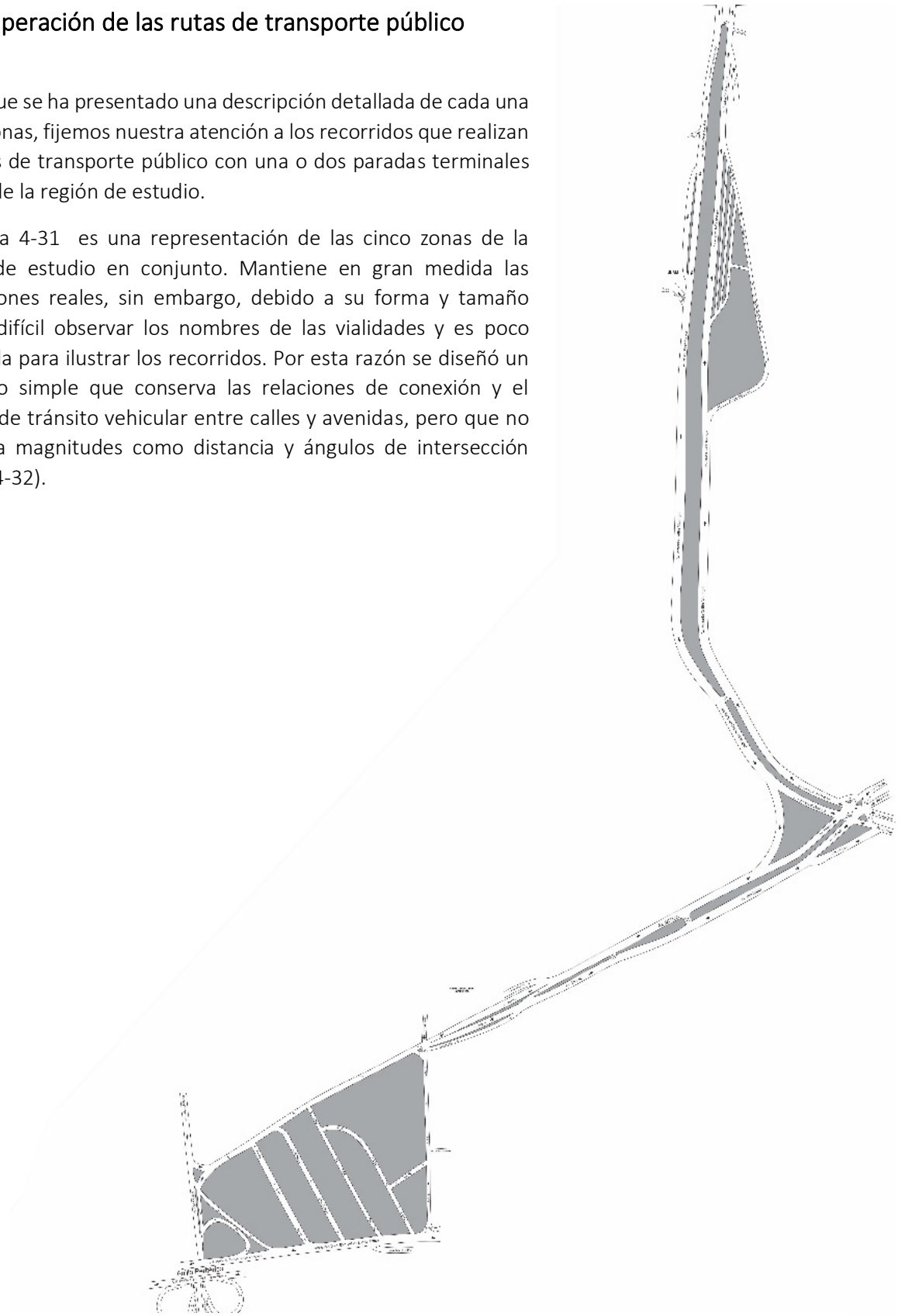


Figura 4-31 Mapa de la región de estudio completa. Fuente: Elaboración propia (2020).

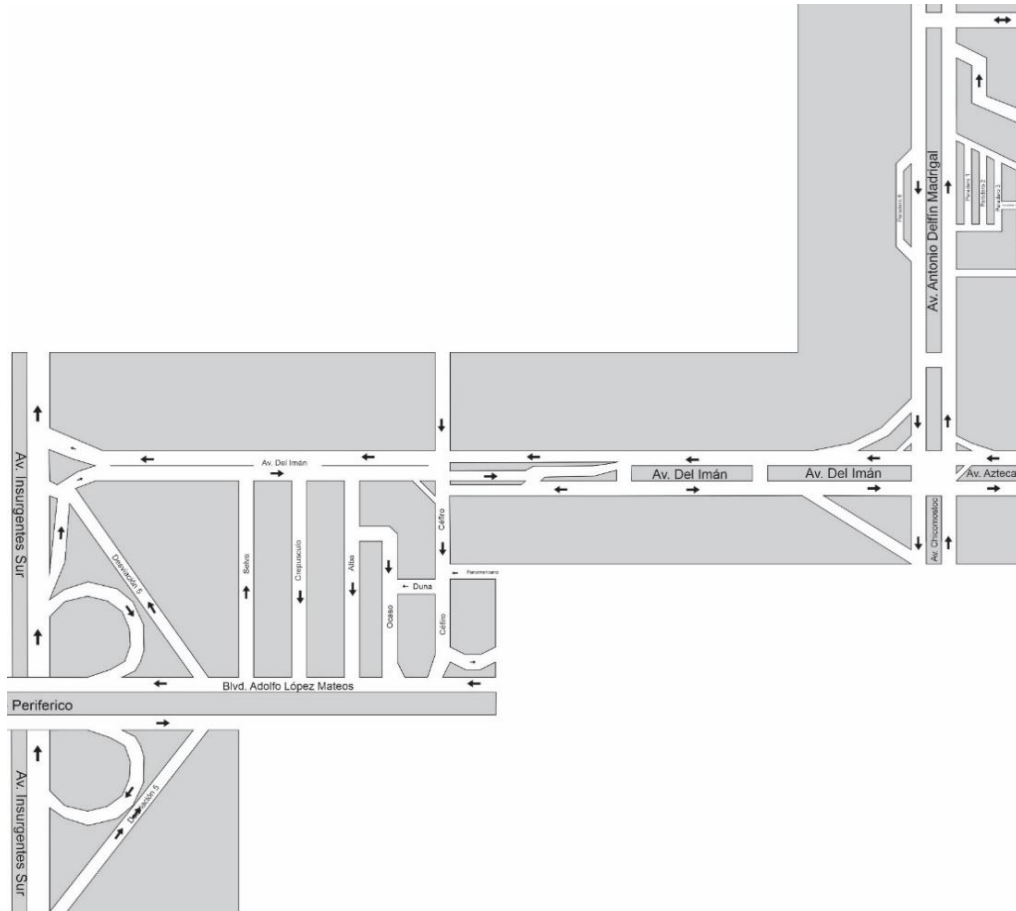


Figura 4-32 Bosquejo de la región de estudio.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

### 4.3.1 Recorridos de las rutas de transporte público

A continuación, se presenta un listado de los distintos recorridos de las rutas de transporte público que operan en la región de estudio. Cada caso considera lo siguiente:

- 1) La información de las rutas incluye los puntos de origen y destino<sup>19</sup> de cada una de sus líneas en operación.
- 2) Recorridos completos distintos, pero semejantes dentro de la región de estudio son clasificados como iguales para este trabajo.
- 3) En las ilustraciones, el inicio y final de los recorridos considera los puntos A1, a1.1 y B2 (Figura 4-33). Sin embargo, debemos recordar que la ubicación de estos puntos varía en cada ruta, como lo indica la Figura 4-33.

<sup>19</sup> La información referente al destino puede presentar falta de especificidad, ya que fue obtenida a partir de encuestas realizada a los despachadores en CETRAM Universidad, quienes por cuestiones de seguridad respecto a su trabajo no proporcionaron datos puntuales. La información de las entrevistas se complementó con la de los letreros que UTP muestran a los usuarios. En el caso del RTP, se extrajo información desde (México\_c, 2018). Por estas razones los destinos presentados pueden referirse a una localización específica o a una zona en general.

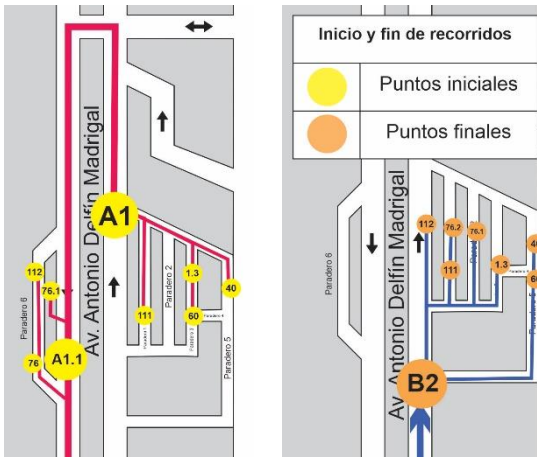


Figura 4-33 Puntos de inicio y fin de recorridos de UTP en CETRAM Universidad.

Fuente: Elaboración propia (2020).

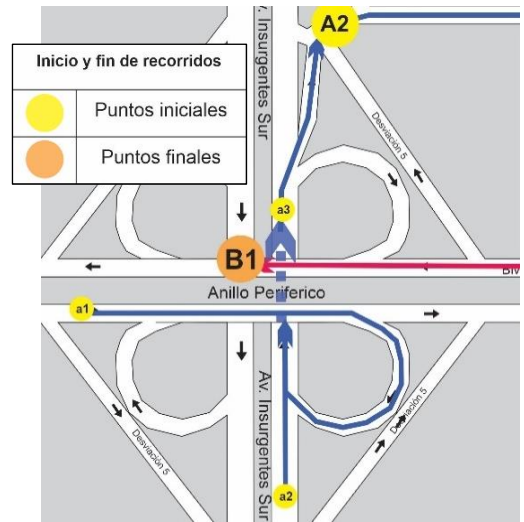
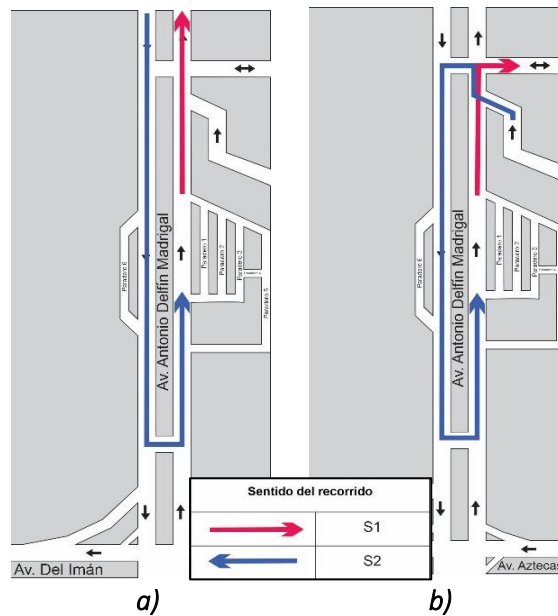


Figura 4-34 Puntos de inicio y fin de recorridos cerca de la estación Perisur del Metrobús.

Fuente: Elaboración propia (2020).

- 4) Análogamente, en las ilustraciones, los recorridos que comienzan y finalizan cerca de la estación Perisur del Metrobús, consideran los puntos A2 y B1 (Figura 4-34). Observemos que previo al punto inicial A2, existen dos orígenes distintos, a1 y a2, que se intersecan a partir de a3.

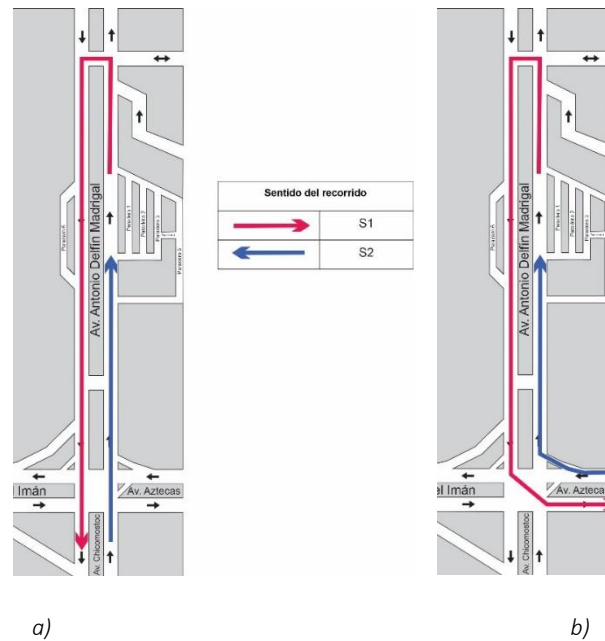
Figura 4-35 Recorrido R1



Fuente: Elaboración propia (2020).

Líneas de transporte público que realizan el recorrido R1				
Ruta	Línea	Origen	Destino	Recorrido
RTP	125	CETRAM Universidad	Bosques del Pedregal	a)
	128	CETRAM Universidad	Oyamel/San Bernabé	a)
	123-A	CETRAM Universidad	Pedregal de San Nicolás	a)
R29.2	1	CETRAM Universidad	Reloj	b)
	2	CETRAM Universidad	CETRAM Taxqueña	b)
	3	CETRAM Universidad	Prepa 5	b)

Figura 4-36 Recorrido R2



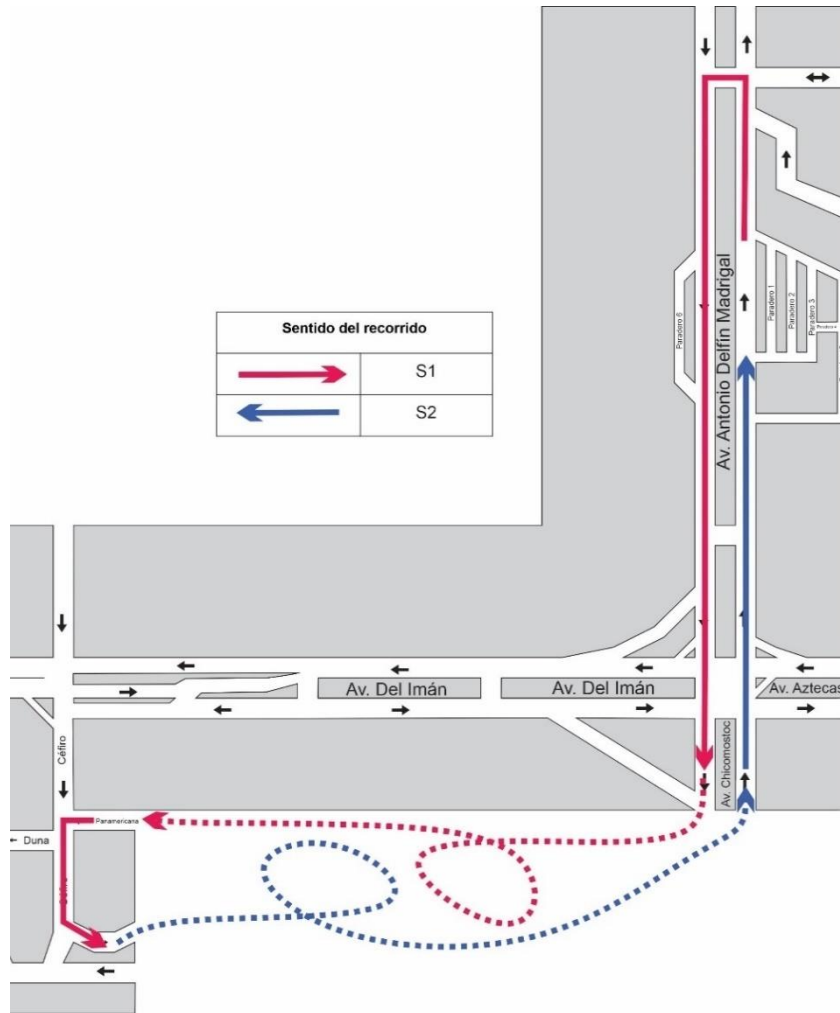
. Fuente: Elaboración propia (2020).

Líneas de transporte público que realizan el recorrido R2				
Ruta	Línea	Origen	Destino	Recorrido
RTP	17-E	CETRAM Universidad	San Pedro Martir	a)
	134-C	CETRAM Universidad	Santo Tomás Ajusco	a)
	134-D	CETRAM Universidad	Topilejo	a)
	162-D	CETRAM Universidad	Santa Catarina	b)
R29.1	1	CETRAM Universidad	Prepa 5 /clínica 32	b)
	2	CETRAM Universidad	Xotepingo /Clínica 46	b)
R1.1	1	CETRAM Universidad	La Joya /San Pedro Martir	a)
	2	CETRAM Universidad	Calle Verde /Tlaxopan / Caseta Tlalpan	a)
R95.1	1	CETRAM Universidad	Cafetales	b)
	2	CETRAM Universidad	Sauzales	b)

Ambos recorridos se consideran semejantes en este trabajo, ya que tiene puntos semejantes de entrada/salida respecto a la zona de estudio en cuestión.



Figura 4-37 Recorrido R3.



Fuente: Elaboración propia (2020).

Líneas de transporte público que realizan el Recorrido R3				
Ruta	Línea	Origen	Destino	Observaciones
R1.2	1	CETRAM Universidad	Céfiro, Periférico.	El recorrido corresponde a la única línea de la ruta R1.2. Coincide en gran parte con el recorrido 2. La diferencia es que el recorrido en sentido S1, después Av. Delfín Madrigal, continua fuera de la región de estudio (línea punteada), posteriormente vuelve a la región de estudio a través de Av. Panamericana; continua por un segmento de céfiro y sale nuevamente de la región.

Figura 4-38 Recorrido (R4)



Fuente: Elaboración propia (2020).

Líneas de transporte público que realizan el recorrido R4					
Ruta	Línea	Origen	Destino	Observación	
R40	1	CETRAM Universidad	COPESA /Colonia Hidalgo /Tepeximilpa		
	2	CETRAM Universidad	CORREPSA /Colonia hidalgo/ Carretera		
R60	1	CETRAM Universidad	Torres López		
	2	CETRAM Universidad	Torres /Chedraui		
	3	CETRAM Universidad	Cuchilla		
	4	CETRAM Universidad	Casino		
	5	CETRAM Universidad	Torres (CCH Sur)		
R1.3	1	CETRAM Universidad	San Fernando / Huipulco		
	2	CETRAM Universidad	Villa Coapa		
R111	1	CETRAM Universidad	Six Flags / Bosques		
R76	1	CETRAM Universidad	Chichicasca / Milpas		El recorrido en sentido S1 inicia al final del paradero 6, sobre Av. Antonio Delfín Madrigal.
	2	CETRAM Universidad	PEMEX / Blvd. De la Luz		

Figura 4-39 Recorrido R5



Fuente: Elaboración propia (2020).

Líneas de transporte público que realizan el Recorrido R5				
Ruta	Línea	Origen	Destino	Observaciones
R76.1	1	CETRAM Universidad	Pedregal de Carrasco	El recorrido corresponde a la única línea de la ruta R76.1. Coincide en gran parte con el recorrido 4, la diferencia radica en S1, donde cambian el punto de inicio y la calle de conexión entre Av. del Imán y Blvd. Adolfo López Mateos. El recorrido en sentido S2 es completamente igual al del recorrido 4.

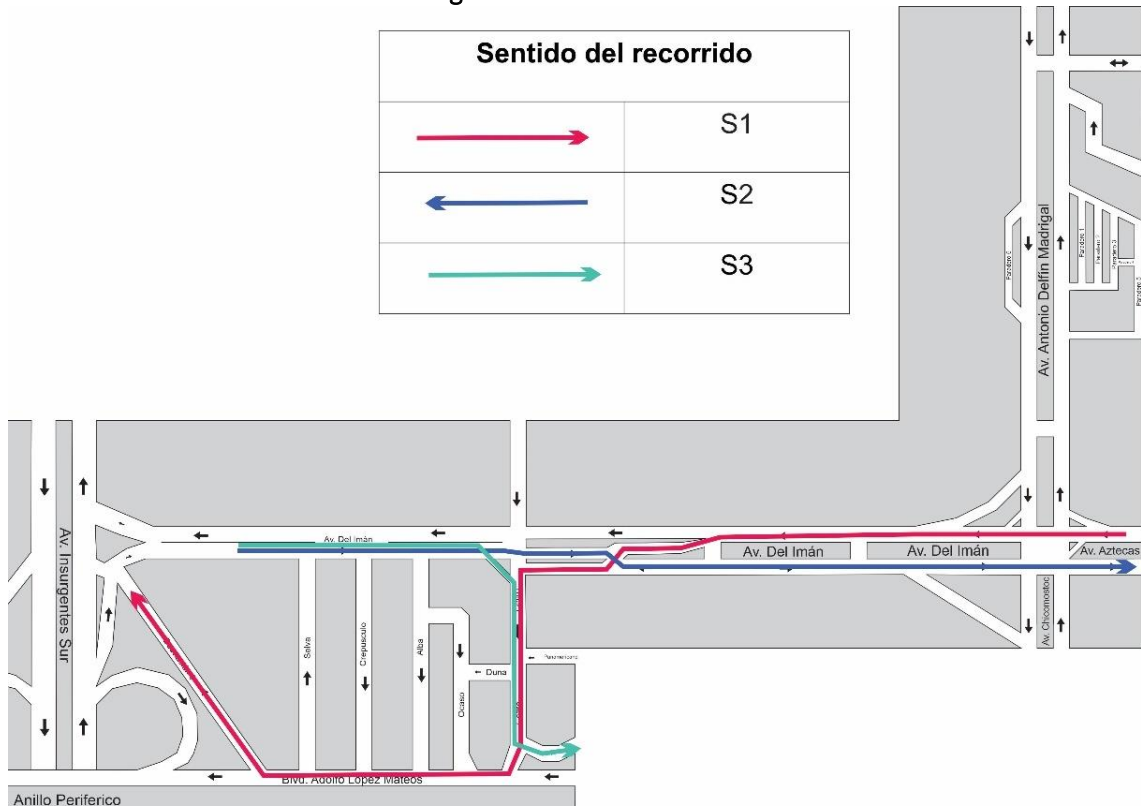
Figura 4-40 Recorrido R6



Fuente: Elaboración propia (2020).

Líneas de transporte público que realizan el Recorrido R6				
Ruta	Línea	Origen	Destino	Observaciones
R112	1	CETRAM Universidad	Santa Martha	El recorrido corresponde a la única línea de la ruta R112. Coincide en gran parte con el recorrido 4. La única diferencia es que el recorrido S2 no es a partir de la zona 5 por Av. Insurgentes, sino desde la zona 4 por Blvd. Adolfo López Mateos, que continúa por la Desviación 5.

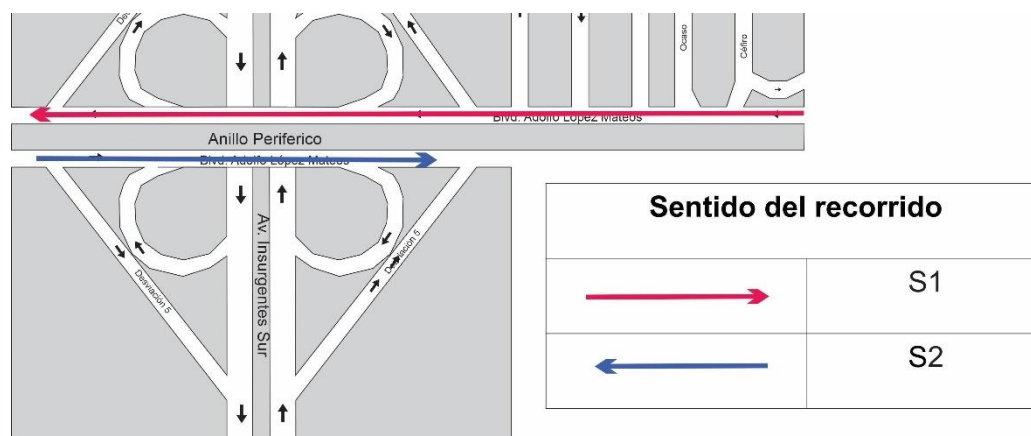
Figura 4-41 Recorrido R7



Fuente: Elaboración propia (2020).

Líneas de transporte público que realizan el Recorrido R7				
Ruta	Línea	Origen	Destino	Observaciones
R1.T	1	Zona 4, Perisur	CETRAM Taxqueña	Los puntos de entrada y salida a la región de estudio son en Av. Del Imán en la zona 2. Aunque las líneas 1 y 2 de la ruta R13.T tiene los mismos puntos de origen y destino, el recorrido, fuera de la zona de estudio no es el mismo.
R13.T	1	Zona 4, Perisur	CETRAM Taxqueña	
	2	Zona 4, Perisur	CETRAM Taxqueña	
R13.T	3	Zona 4, Perisur	OTRO: Tlalpan (Huipulco, E. Azteca)	El recorrido de la línea 3 de la ruta R13.T, a partir de la zona 4, es bastante diferente al de las demás rutas que salen de ese punto. Además, el intervalo de salida de esta línea es de 30-40 minutos; Por estas razones dicho recorrido se considera diferente y se denota por S3 en la Figura 4-41.

Figura 4-42 Recorrido R8



Fuente: Elaboración propia (2020).

Líneas de transporte público que realizan el Recorrido R8				
Ruta	Línea	Origen	Destino	Observaciones
R39	1	Estadio Azteca	Santo Tomas Ajusco	Ninguna de estas líneas tiene base dentro de la región de estudio.
	1	Canal de Chalco	Toreo de 4 Caminos	
	2		Tacubaya	
3	Barranca del Muerto			
RTP	57-A	Metro constitución de 1917	Metro Cuatro Caminos	

Las 13 rutas que salen de CETRAM Universidad operan un total de 31 líneas diferentes. En este trabajo solo serán de interés aquellas cuyo recorrido permiten la conexión entre CETRAM Universidad y la estación Perisur del Metrobús, es decir, las rutas R40, R60, R76, R76.1, R1.3 y R111 (Recorridos 4 y 5) que en conjunto operan un total de 13 líneas. A partir de este punto, serán nombradas simplemente como *rutas con terminal en CETRAM Universidad*. La ruta R112 tiene un recorrido similar (R6) en el sentido S1, pero debido al punto de inicio del recorrido S2 y la poca frecuencia de salida desde CETRAM Universidad, esta ruta no siempre será considerada.

Por otro lado, las rutas R1.T, R13.T también serán consideradas, pero con menor grado de importancia ya que en pocas ocasiones realizan viajes completos dentro de la región de estudio. Sin embargo, muchos pasajeros que utilizan estas líneas realizan al menos una parada dentro de la región, ya sea para abordar o para descender las unidades. Estas rutas serán referidas como *rutas con terminal en CETRAM Taxqueña* (dejando fuera de consideración la línea 3 de la ruta 13.T, cuya terminal se ubica en un punto diferente).

### 4.3.2 Paradas de los recorridos

Los recorridos de unidades de transporte público se diferencian de los recorridos de vehículos particulares, por realizar paradas continuas en determinados puntos, donde los pasajeros ascienden o descienden. La Figura 4-43 muestra la ubicación de *las principales paradas* intermedias del recorrido R4. En el sentido S1 se identificaron 7 paradas, denotadas por la letra P. En el recorrido S2 solamente se identificaron 4 paradas, denotadas por la letra Q.

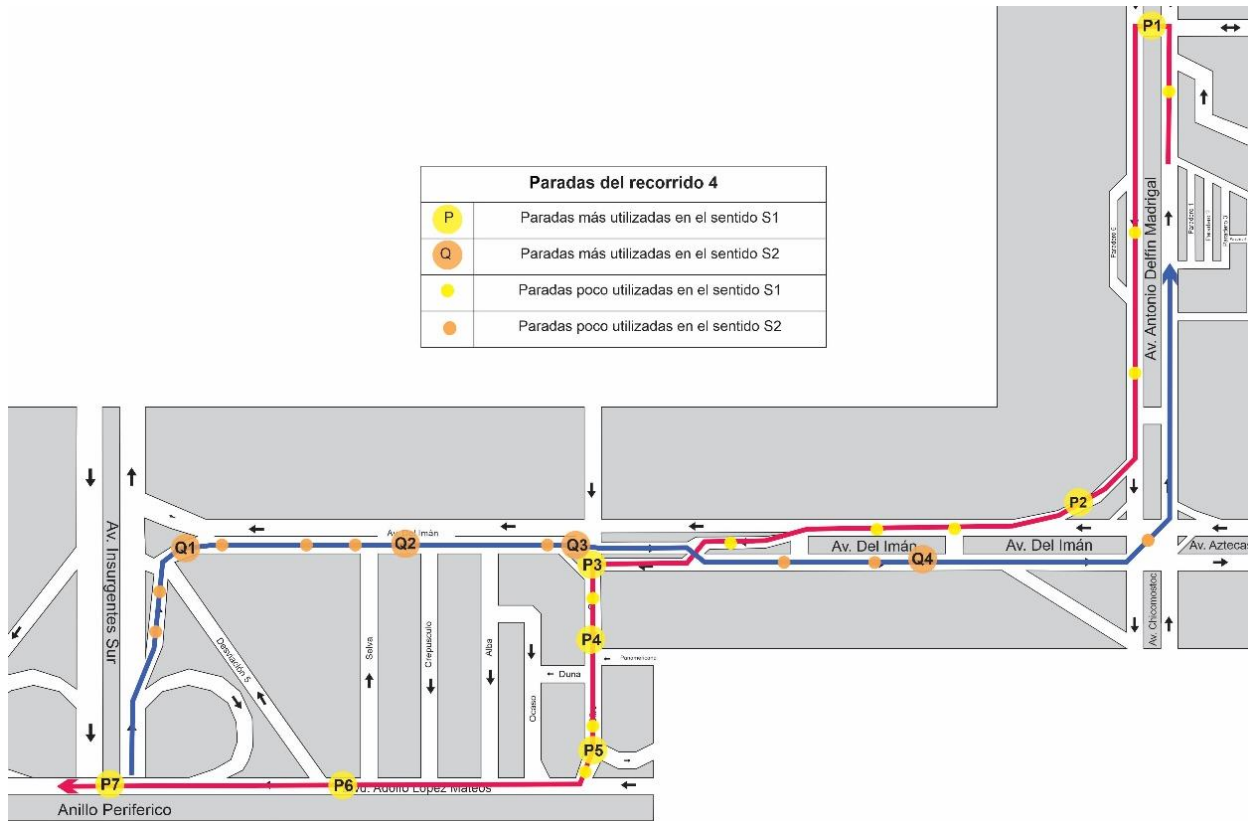


Figura 4-43 Principales paradas de las Unidades de Transporte Público en el Recorrido 4, sentido S1 y S2.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Tengamos en cuenta que al inicio del recorrido S1, en CETRAM Universidad, se realiza la primera parada en la cual solo abordan pasajeros. Esta parada puede ser considerada P0. Análogamente, al final del recorrido S2, las UTP realizan la última parada en CETRAM Universidad, donde todos los pasajeros a bordo desalojan la unidad. Esta parada puede ser considerada Q5.

Además de las paradas principales, algunos usuarios solicitan parada de la UTP en otras ubicaciones, que por lo general involucran a un único usuario y su utilización es baja a diferencia de aquellas que fueron numeradas previamente, por esta razón, son consideradas *paradas secundarias*. La zona en donde se ha observado este tipo de solicitud se ilustra en la Figura 4-43 por medio de puntos sin numeración.

Las rutas R1.T y 13.T, utilizan las mismas ubicaciones para realizar paradas sobre Av. Del Imán, Céfiro y Blvd. Adolfo López Mateos, a lo largo de sus recorridos.

Otro de los recorridos de interés es el Recorrido R5, correspondiente a vagonetas de la ruta R76.1. La ubicación de paradas principales y secundarias de ilustra en la Figura 4-44.

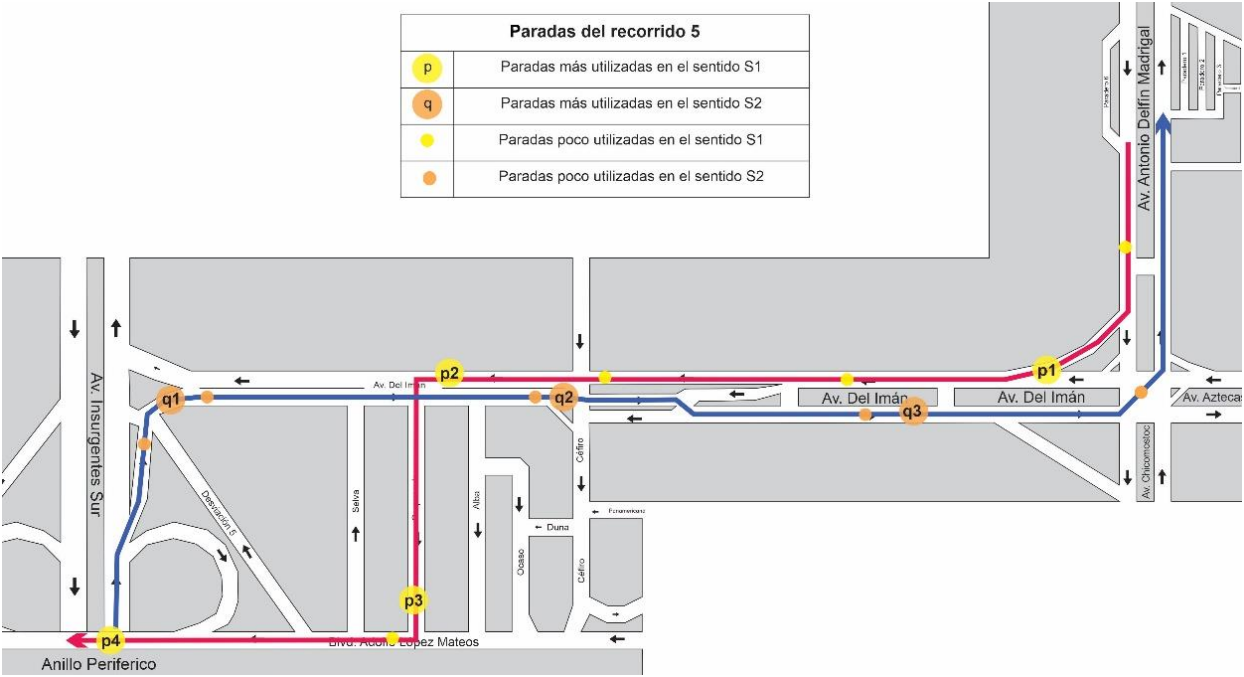


Figura 4-44 Paradas principales y secundarias de las Unidades de Transporte Público en el Recorrido 5, sentido S1 y S2. Fuente: Elaboración propia (2020).

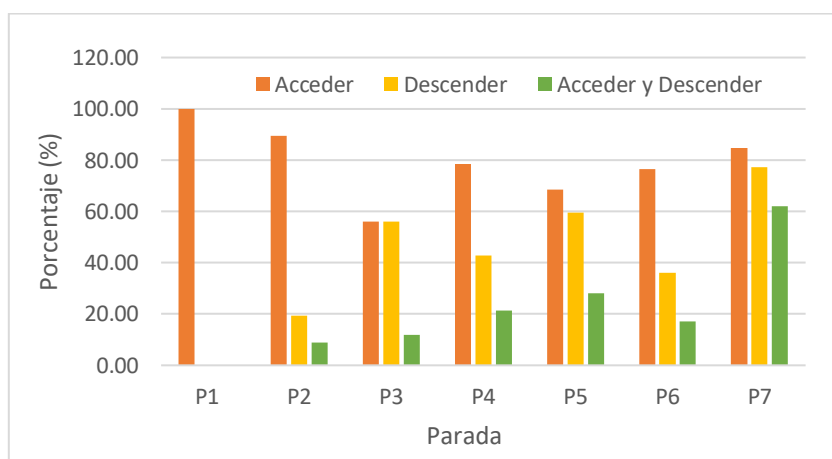


### 4.3.3 Propósito de paradas principales

En esta sección y en la siguiente, se consideran únicamente los recorridos de las rutas con terminal en CETRAM Universidad. Recordemos que el recorrido R4 corresponde a rutas que operan con vehículos tipo camión, mientras que el recorrido R5 involucra únicamente vagonetas. Las gráficas que se presentan surgen a partir de la información obtenida de recorridos realizados en camiones y vagonetas<sup>20</sup>, en ambos sentidos.

El propósito de las paradas es diferente en cada sentido de los recorridos y un factor importante por considerar en S1 es que el recorrido comienza en la parada inicial del recorrido completo de las líneas, en consecuencia, las primeras paradas de este recorrido son mayormente utilizadas para abordar la UTP, puesto que los usuarios tienen puntos destinos lejanos.

La Gráfica 4-1 muestra la utilización de las siete paradas principales del recorrido R4-S1, de tal manera que la primera barra (naranja) indica el porcentaje de recorridos en los cuales se observó el ascenso de pasajeros en la parada; la segunda barra (amarilla) indica el porcentaje de recorridos donde se observaron descensos y la tercera barra (verde) muestra el porcentaje de recorridos donde se observaron los dos tipos de movimientos.



Gráfica 4-1 Motivo de paradas en el recorrido R4-S1.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

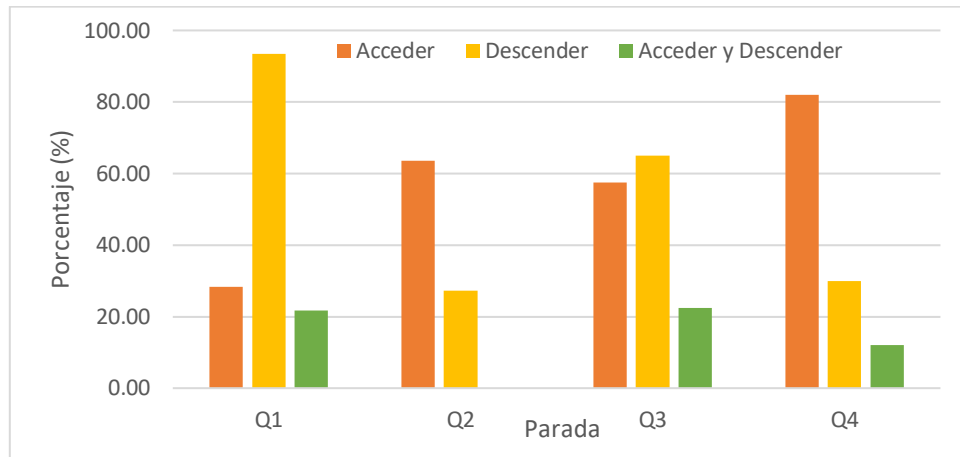
De la gráfica anterior, podemos observar los pasajeros no utilizan P1 para descender, sino que los descensos comienzan a partir de P2. Por el contrario, P1 es utilizada exclusivamente para ascensos y en el resto de las paradas, el porcentaje de ascensos supera el 50% (ver, Gráfica 4-1).

Por otro lado, P7 es la última parada del recorrido R4, pero no corresponden a la última parada del recorrido completo de las líneas, por lo que, en tal parada se realizan ascensos y descensos (no solo descensos). P7 presenta el mayor porcentaje de utilización para acceder y descender simultáneamente en comparación con el resto de las paradas de R4-S1

En cuanto R4-S2, la Gráfica 4-2 indica que la parada Q4, a pesar de aproximarse al final del recorrido, presenta un alto porcentaje de utilización para acceder a la UTP. Q1, por su parte presenta el mayor

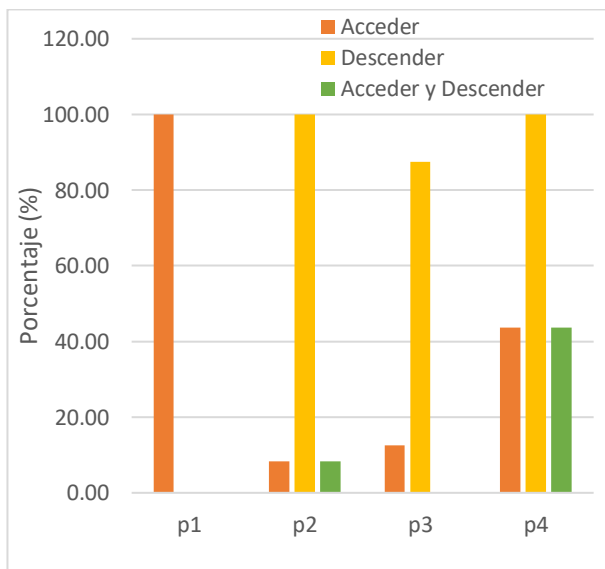
<sup>20</sup> Los aspectos metodológicos para recolectar información de los recorridos en UTP se presentan en el la sección 5.2.1 *Recolección y organización de datos e información* (pág. 101)

porcentaje de utilización para descender. Ninguna de las paradas rebasa el 25% de utilización destinada a ascensos y descensos simultáneos.

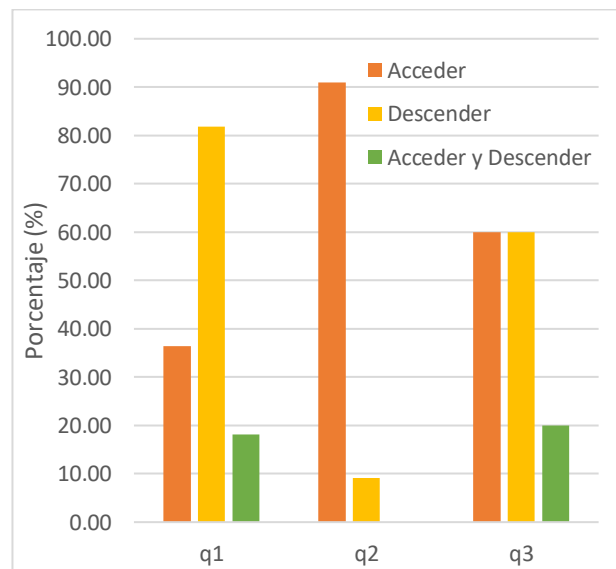


Gráfica 4-2 Motivo de paradas en el recorrido R4-S2.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Por otro lado, los principales motivos de parada en R5 se presentan en la Gráfica 4-3 y Gráfica 4-4. En S1 solamente p1 presenta alto porcentaje para acceder y el resto de las paradas tienen como motivo principal el descender a los pasajeros (entre el 80% y el 100%). En S2, q2 es la parada más utilizada para acceder y q1 para descender, mientras que q3 presenta igual porcentaje de utilización para acceder y descender.



Gráfica 4-3 Motivo de paradas en el recorrido R5-S1.  
Fuente: Elaboración propia (2020).



Gráfica 4-4 Motivo de paradas en el recorrido R5-S2.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

#### 4.3.4 Duración y velocidad de los recorridos

Para calcular la velocidad promedio de los recorridos en sentido S1 se consideró el tiempo promedio de recorrido<sup>21</sup> y la distancia de A1 a B1 (ver Figura 4-45), sumada a la distancia promedio que existe desde la base de las rutas R40, R60, R1.3 y R111 hasta A1 de acuerdo con los datos de la Tabla 4-8 que fueron obtenidos con las herramientas de Google Maps. Para las rutas R76 y R76.1 se considera el inicio del recorrido a partir del punto A1.1.

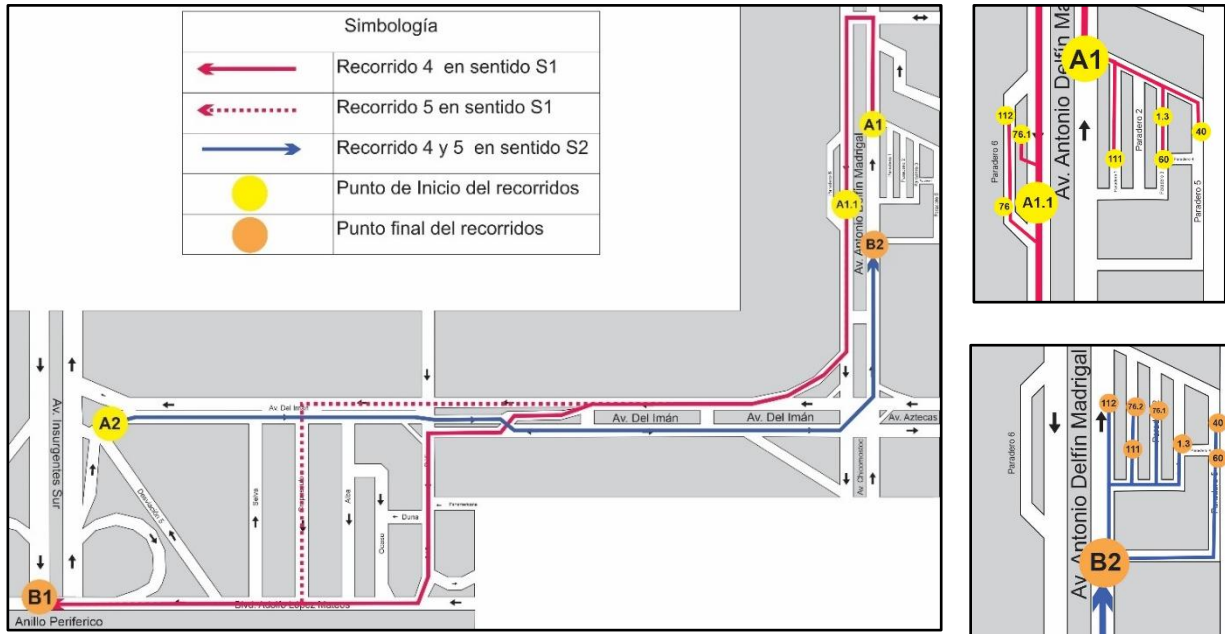


Figura 4-45 Inicio y fin de los recorridos R4 y R5, sentido S1 y S2.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Tabla 4-8 Distancias del recorrido S1, desde el paradero de cada ruta.

Ruta	Desde el paradero de la ruta hasta A1(metros)	Desde A1 hasta B1 (metros)	Desde el paradero de la ruta hasta B1 (metros)
<b>R40</b>	203	4272	4475
<b>R1.3</b>	215	4272	4487
<b>R60</b>	287	4272	4559
<b>R111</b>	311	4272	4583
<i>Promedio</i>	254	4272	4526
<b>R76.1</b>	<i>Desde A1.1 hasta B1</i>		3608

Fuente: Elaboración propia (2020).

<sup>21</sup> Los aspectos metodológicos para recolectar información de los recorridos en UTP se presentan en el la sección 5.2.1 *Recolección y organización de datos e información* (pág. 101)

De manera similar, para estimar la distancia del recorrido S2 se utilizó la distancia promedio entre el punto B2 (ver Figura 4-45) y el final de los recorridos de cada ruta (Tabla 4-9).

**Tabla 4-9 Distancia del recorrido S2, hasta el paradero de cada ruta.**

<i>Ruta</i>	<i>Desde A2 hasta B2 (metros)</i>	<i>Desde B2 hasta el final de recorrido de cada ruta(metros)</i>	<i>Desde inicio de recorrido hasta B1 (metros)</i>
<b>40</b>	2864	510	3374
<b>1.3</b>	2864	372	3236
<b>60</b>	2864	420	3284
<b>111</b>	2864	370	3234
<b>112</b>	2864	480	3344
<b>76.1</b>	2864	470	3334
<b>76.2</b>	2864	465	3329
<i>Promedio</i>	2864	441	3305

*Fuente: Elaboración propia (2020).*

Cuatro conclusiones inmediatas de las tablas anteriores son:

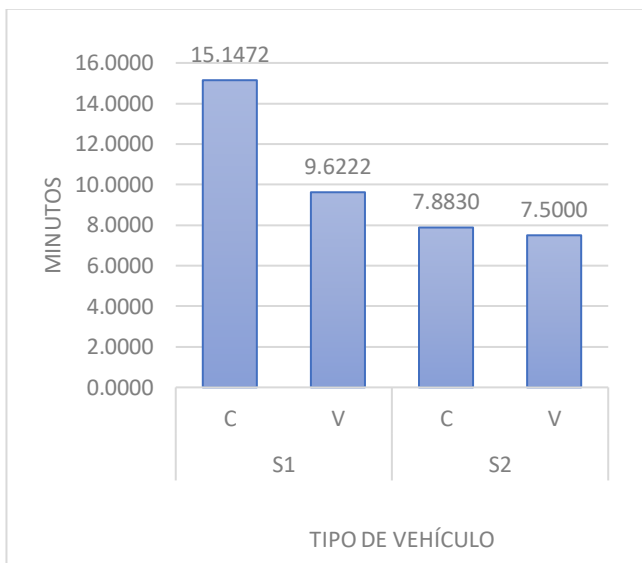
1. El recorrido en S1 es de mayor longitud que en el sentido S2.
2. El recorrido en S1 es de aproximadamente 4.526 km para las rutas R40, R60, R111 y R1.3.
3. El recorrido en S1, para la ruta R76.1 que inicia en A2, es de aproximadamente 3.6 km.
4. El recorrido en S2 es similar para todas las rutas y la distancia promedio es de 3.3 km.

Una observación muy interesante es que, para los pasajeros que realizan el recorrido S1 y cuyo destino es antes o en el punto B1, es conveniente utilizar las rutas R76 o R76.1, que comienzan en A1.1 y no desde A1. Se ha observado que recorrer el segmento A1-A1.1 en UTP, toma en promedio 4.42 minutos, pero el tiempo puede prolongarse hasta casi 8 m. en situaciones de congestión vehicular. Por supuesto que debe considerarse el origen de los pasajeros que llegan a CETRAM Universidad, ya que cuando los paraderos más cercanos sean alrededor de A1, quizá sea mejor abordar las rutas desde tal punto en lugar de dirigirse hacia A1.1 caminando. Entonces, considerando el origen de los usuarios, dentro de CETRAM Universidad, acceder a las UTP desde A1.1 puede resultar conveniente solo para aquellas personas que salen de la estación del metro y cuya distancia y tiempo de acceso hacia A1 y A1.1 es similar, o para quienes se aproximan desde la Universidad. Estas observaciones no proporcionan beneficio a los pasajeros con destino después del paradero Perisur, ya que a partir de ese punto los recorridos de las rutas dejan de coincidir.

Continuando con el análisis de duración y velocidad de recorridos, a continuación, se presenta una serie de gráficas comparativas, donde se consideran dos clases de vehículos: *Camión* (CV, CM y M) y *Vagoneta* (V), que operan en los recorridos R4 y R5, respectivamente. La duración promedio de los recorridos fueron obtenidos con la aplicación OruxMaps y un reloj digital, de los cuales se ha considerado como dato representativo el promedio de ambos<sup>22</sup>.

La Gráfica 4-5, muestra la duración promedio de viaje en ambos sentidos del recorrido. Podemos apreciar que existe una diferencia significativa de aproximadamente 5.5 minutos entre los recorridos de camiones y vagonetas en S1. Mientras que la duración de recorridos en S2 son similares.

El tiempo, es un parámetro que se encuentra completamente relacionado a la distancia de recorrido y puede variar proporcionalmente, de manera que largas distancias son asociadas con grandes tiempos de recorrido. Por otra parte, la velocidad es un parámetro que relaciona las dos magnitudes, y en este trabajo, será considerado como un indicador de desempeño de los recorridos.

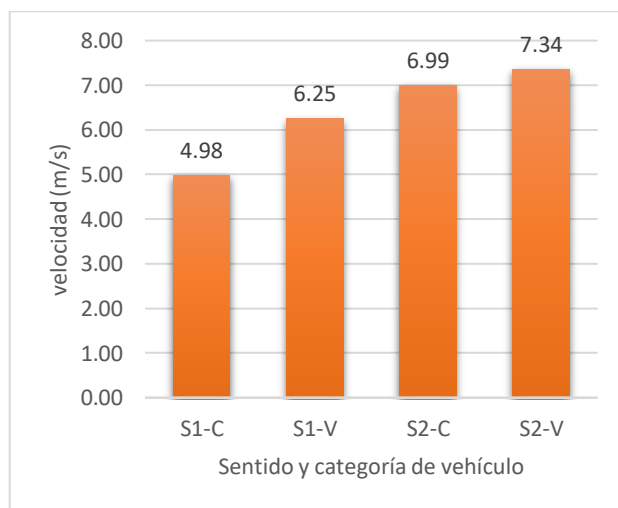


Gráfica 4-5 Duración promedio de viaje en ambos sentidos de los recorridos R4 y R5 (Camiones y vagonetas).  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Para calcular la velocidad promedio de los recorridos, se tomaron en cuenta los tiempos promedio de la Gráfica 4-5 y las distancias promedio de la Tabla 4-8 y la Tabla 4-9.

La Gráfica 4-6 nos permite comparar la velocidad media en cada sentido de los recorridos. Observemos que, los camiones en S1 presentan la menor velocidad (4.98 m/s). Sin embargo, la diferencia con respecto a las vagonetas (6.25 m/s) es menor que en el caso de la duración de recorridos.

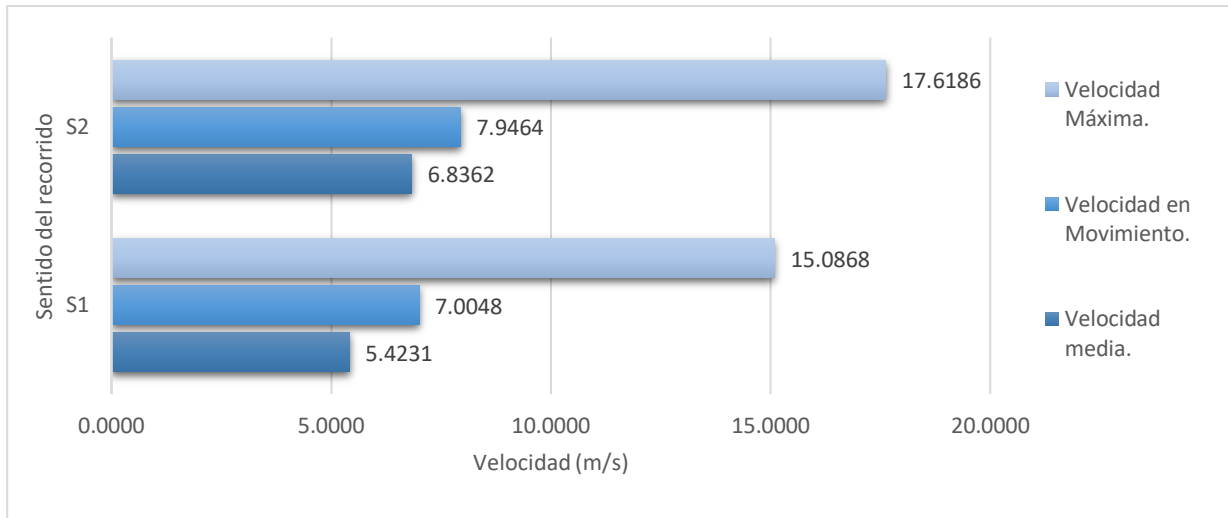
Por otro lado, para ambas clases de vehículos, la velocidad media es mayor en el sentido S2, en comparación con S1.



Gráfica 4-6 Velocidad promedio de recorrido en S1 y S2, (camiones y vagonetas).  
Fuente: Elaboración propia (2020).

<sup>22</sup> Los aspectos metodológicos para recolectar información de los recorridos en UTP se presentan en el la sección 5.2.1 *Recolección y organización de datos e información* (pág. 101)

Por otro lado, a partir de la información de OruxMaps, surge la Gráfica 4-7, donde es posible comparar la velocidad media<sup>23</sup>, la velocidad en movimiento y la velocidad máxima de camiones, en ambos sentidos del recorrido. De manera general, observemos que las tres velocidades en S2 son mayores a las de S1. Es decir, además de que el recorrido S2 es de menor longitud, los vehículos suelen alcanzar velocidades mayores a las del recorrido S1. Estos dos factores se ven reflejados como menores tiempo de viaje en el sentido S2.



Gráfica 4-7 Velocidad media, en movimiento y máxima en S1 y S2 (camiones y microbuses).

Fuente: Elaboración propia a partir de información de OruxMaps (2020).

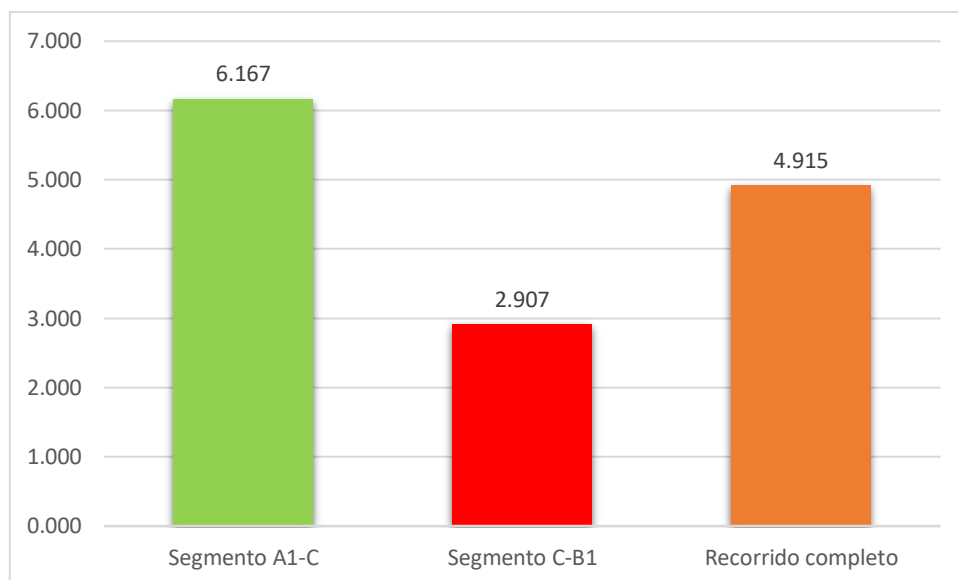
Después de conocer la diferencia de velocidades en cada sentido de los recorridos, resulta interesante estudiar a detalle S1 para la clase de camiones, caso en el que los tiempos de viaje son mayores. Para este análisis, el recorrido se fragmentó en dos secciones A1-C y C-B1 (ver Figura 4-46). La velocidad media en cada sección fue considerada como el promedio de las velocidades de 21 recorridos realizados en camión. Para calcular la velocidad de cada recorrido, se consideró el tiempo obtenido en relojes digitales. La información de la aplicación OruxMaps no fue considerada, ya que el reporte estadístico que proporciona es del recorrido completo y no es posible obtener información específica por secciones. Por esta razón, la velocidad media del recorrido completo S1 es 4.915 m/s, presentando una pequeña variación con respecto a los datos de la Gráfica 4-6, donde la velocidad media resultó ser 4.98.

En la sección C-B1 se identifica un cuello de botella sobre la calle Céfiro. A pesar de que el mayor problema de congestión vehicular se encuentra sobre Blvd. Adolfo López Mateos, las unidades de transporte público comienzan a disminuir su velocidad desde Céfiro, donde, además, constantemente realizan paradas poco espaciadas.

<sup>23</sup> La velocidad media de la Gráfica 4-7 corresponde a la información obtenida de la aplicación OruxMaps y no coincide con los datos de la Gráfica 4-6, puesto que ésta última también consideró información obtenida de relojes digitales.



La diferencia entre las proporciones del tiempo y la distancia, respecto al recorrido completo, afectan la velocidad media en cada sección. De la Gráfica 4-10 podemos observar que la velocidad en el segmento C-B1 es aproximadamente la mitad de la velocidad media en el segmento A1-C, la cual es mayor que la velocidad media del recorrido completo S1.



Gráfica 4-10 Velocidad media del recorrido R4 en sentido S1 (segmentos A1-C, C-B1 y recorrido completo).  
Fuente: Elaboración propia (2020).

De las entrevistas y observaciones en la región de estudio, se conoce que además de las UTP, cualquier otro tipo de vehículo circulando por esta sección de Blvd. Adolfo López Mateos, disminuyen su velocidad, debido a la numerosa cantidad de unidades de transporte público transitando y realizando paradas. Esta información valida la hipótesis inicial de este trabajo (ver pág. 6).

Se creó que recorridos en UTP, como una alternativa de transporte público para los usuarios, puede reducir la duración de viaje y la cantidad de UTP transitando por la zona, ya que el sistema Metrobús cuenta con carriles exclusivos para el tránsito de unidades y además realiza paradas específicas con ubicación fija. En la siguiente sección se describen los detalles de operación del Metrobús, en particular, de la línea 1.



## 4.4 Operación de la línea 1 del Metrobús

### 4.4.1 Descripción general

La línea 1 del Metrobús inició sus operaciones el 19 de junio de 2005 sobre el corredor Insurgentes de CDMX con una longitud aproximada de 20 km. Posteriormente, la línea se amplió hacia el sur de la ciudad, operando a partir del 13 de marzo de 2008 las estaciones que van desde Dr. Gálvez hasta El Caminero (Metrobús CDMX, 2020).

Actualmente la longitud línea 1 es de aproximadamente 30 km en ambos sentidos y consta de 46 estaciones: 2 terminales y 44 intermedias, mismas que se ilustran en la Figura 4-48. Opera sobre las vialidades Insurgentes Norte, Insurgentes Centro e Insurgentes Sur, atendiendo aproximadamente a 480 mil usuarios por día, principalmente de las alcaldías Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Álvaro Obregón, **Coyoacán** y Tlalpan, de la CDMX. (Metrobús CDMX, 2020).

Un factor importante que caracteriza al sistema Metrobús es la conectividad que permite tanto internamente entre sus líneas como con otros sistemas de transporte como el SCT Metro y el Tren Suburbano. La línea 1 mantiene conexión con el resto de las líneas del sistema Metrobús, excepto con la línea 5. Respecto al STC Metro, permite conexión con las líneas 1, 2, 3, 9, 12 y B (Metrobús CDMX, 2020). La mayoría de estas conexiones se presentan en la zona centro y norte de la ciudad, dejando la zona sur con pocas conexiones.

La línea 1 del Metrobús interseca la Zona 5 de la región de estudio en la Estación Perisur. Para obtener información sobre la velocidad de operación y el tiempo de parada en las estaciones, se recolectaron datos en las secciones comprendidas entre 5 estaciones de la línea: Ciudad Universitaria (CU), Centro Cultural Universitario (CCU), Perisur (P), Villa Olímpica (VO), y Corregidora (C), (ver Figura 4-47).

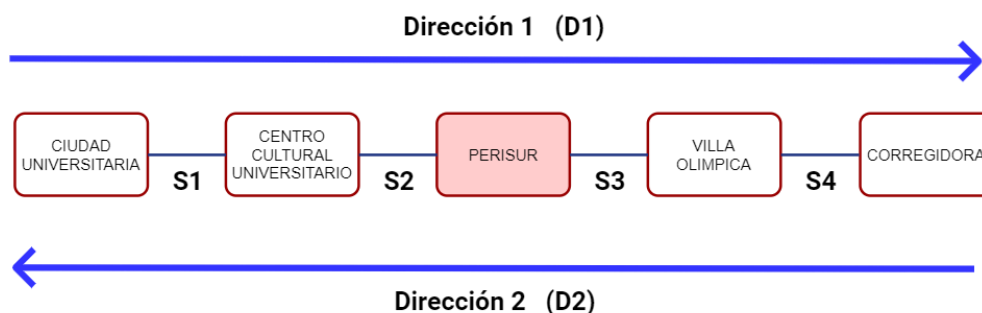


Figura 4-47 Secciones de la línea 1 del Metrobús considerada para la toma de datos.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Figura 4-48 Línea 1 del Metrobús.

Estación	Nombre
1	Indios Verdes
2	Deportivo 18 de Marzo
3	Euzkarro
4	Potrero
5	La Raza. Línea 1.
6	Circuito
7	San Simón
8	Manuel González
9	Buenavista. Línea 1.
10	El Chopo
11	Revolución
12	Plaza de la República
13	Reforma
14	Hamburgo
15	Glorieta Insurgentes
16	Durango
17	Álvaro Obregón
18	Sonora
19	Campeche
20	Chilpancingo
21	Nuevo León
22	La Piedad
23	Poliforum
24	Nápoles
25	Colonia del Valle
26	Ciudad de los Deportes
27	Parque Hundido
28	Félix Cuevas
29	Río Churubusco
30	Teatro Insurgentes
31	José María Velasco
32	Francia
33	Olivo
34	Altavista
35	Bombilla
36	Dr. Gálvez
37	Ciudad Universitaria
38	CCU
39	Perisur
40	Villa Olímpica
41	Corregidora
42	Ayuntamiento
43	Fuentes Brotantes
44	Santa Úrsula
45	La Joya
46	El Caminero



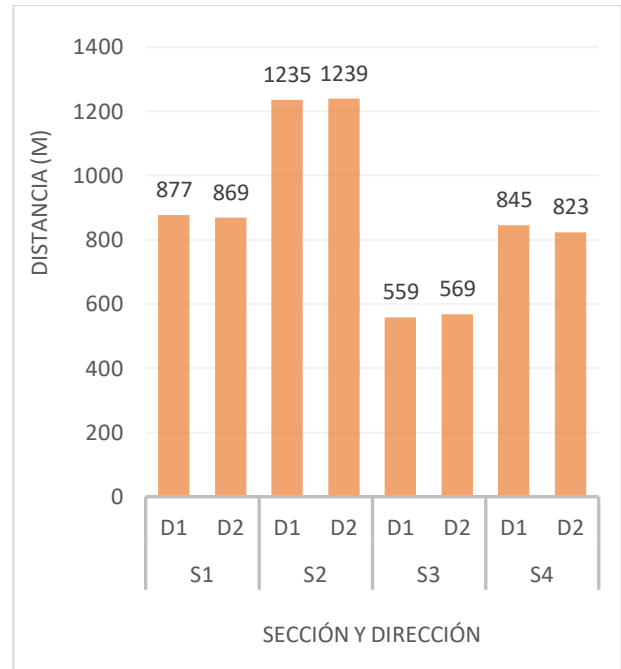
Fuente: (Metrobús CDMX, 2020)

#### 4.4.2 Velocidad de operación

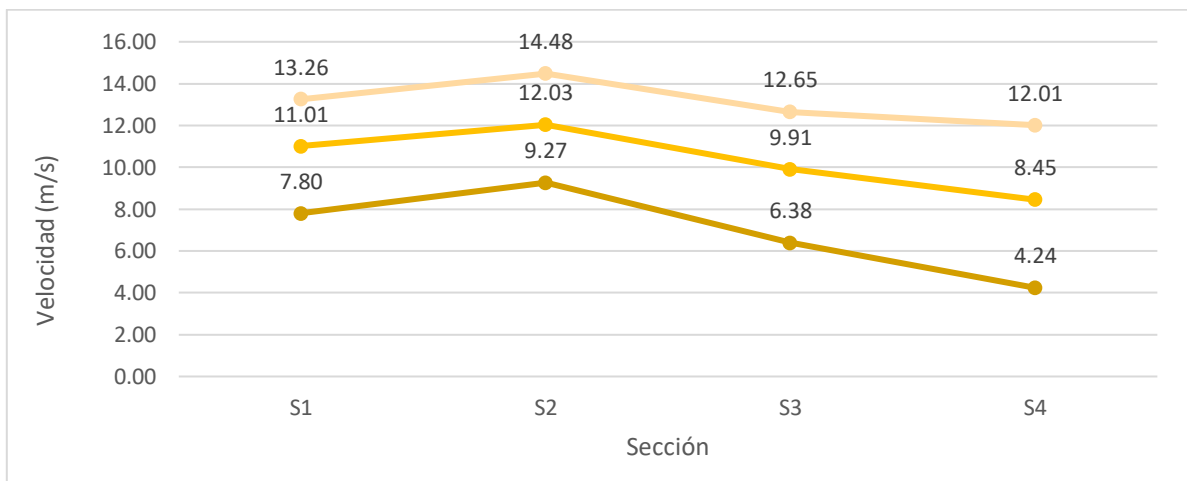
Para estimar la velocidad de operación se consideraron los tiempos de recorrido entre estaciones y las distancias de las secciones S1, S2, S3 y S4 (Figura 4-47), aproximadas con la herramienta *Medir la Distancia* de Google Maps. De la (Gráfica 4-11) podemos notar que existe una pequeña variación en cada sección, dependiendo de la dirección del recorrido.

Para estimar la velocidad media en cada sección, se consideraron las distancias de la Gráfica 4-11 y el tiempo de viaje entre estaciones, que fue medido con un reloj digital<sup>24</sup>.

La Gráfica 4-12 presenta las velocidades mínimas, máxima y promedio, obtenidas en cada sección al considerar ambos sentidos de la línea. Notemos que S4 es la sección con menor velocidad promedio de operación y donde los tres valores presentan mayor variación. Al parecer, un elemento importante que afecta a esta variable es la existencia de semáforos entre las estaciones Villa Olímpica y Corregidora.



Gráfica 4-11 Distancia de cuatro secciones de la línea 1 del Metrobús, en ambas direcciones.  
Fuente: Elaboración propia (2020).



Gráfica 4-12 Velocidad de operación en cuatro secciones de la línea 1 del Metrobús.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

<sup>24</sup> Los aspectos metodológicos para recolectar información de los recorridos en unidades de Metrobús se presentan en la sección 5.2.1 *Recolección y organización de datos e información* (pág.107 )

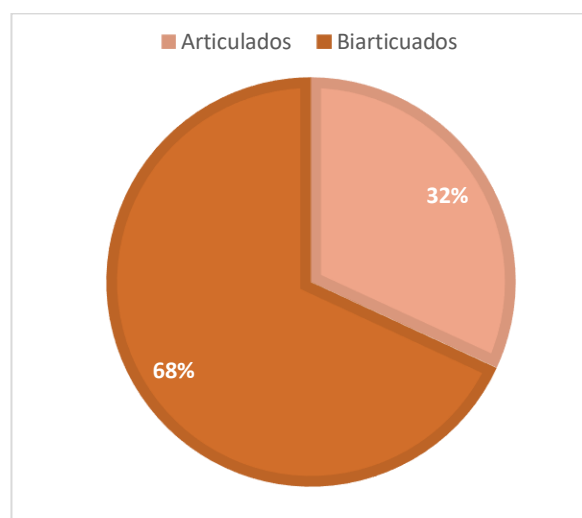
En las secciones S1, S2 y S3 no existen semáforos y el flujo de unidades de Metrobús es más rápido. Sin embargo, la velocidad promedio no es igual en las tres secciones. En los sistemas BRT, distancias cortas entre estación impiden que los autobuses alcancen altas velocidades mientras que grandes distancias permiten alcanzar altas velocidades. Por esta razón, de las tres secciones, S2 presenta la mayor velocidad, seguida de S1 y posteriormente S3, en el mismo orden que al considerar la distancia de forma decreciente.

#### 4.4.3 Unidades en operación

El sistema Metrobús opera con autobuses articulados, biarticulados, híbridos y de doble piso (México\_d, 2018). En la línea 1 solo se observaron unidades articuladas (con dos vagones) y biarticuladas (con tres vagones, ver Gráfica 4-13), cuya capacidad es de 160 y 240 pasajeros respectivamente (México\_d, 2018).

De acuerdo con observaciones realizadas en las cinco estaciones seleccionadas para la toma de datos, las unidades que llegan a la estación CU en dirección D1 (de Norte a Sur) se encuentran entre el 13% y 57% de su capacidad máxima. En cambio, cuando las unidades llegan a la estación Corregidora, en dirección D2 (de Sur a Norte), el porcentaje de ocupación es mayor, entre el 17% y 92%.

Las Unidades de Metrobús operando en la línea 1 serán referidas en adelante como **UMB**, sin importar la cantidad de vagones.

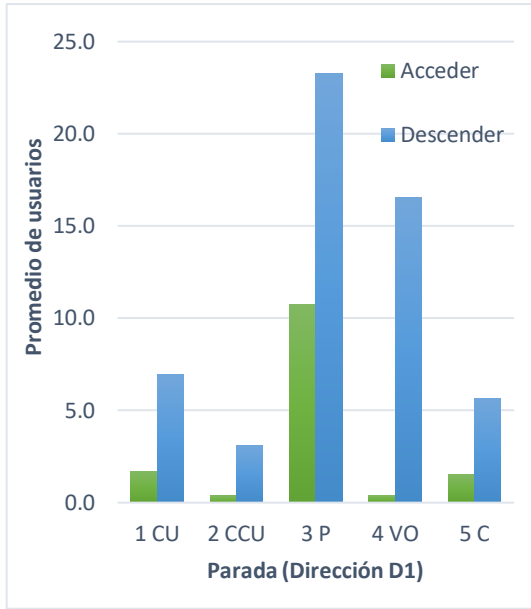


Gráfica 4-13 Tipo de unidades observadas en el periodo de recolección de información, en la línea 1 del Metrobús.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

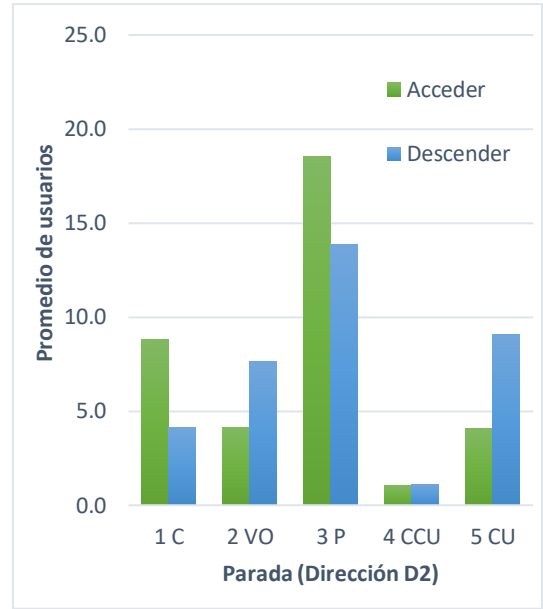
#### 4.4.4 Tiempo y motivo de parada<sup>25</sup>

Durante la recolección de datos se observó que la cantidad de usuarios que ascienden y descienden de las unidades es diferente en cada parada y en cada dirección de recorrido. Por ejemplo, en D1, siempre es mayor la cantidad de pasajeros que descienden, situación que no sucede en D2 (ver Gráfica 4-14 y Gráfica 4-15). Por otro lado, la estación Perisur presenta el mayor promedio de pasajeros que acceden, en D1 y de pasajeros que descienden en D2. Contrariamente, la estación CCU presenta los menores valores en ambas direcciones, lo que significa que se trata de una parada poco utilizada.

<sup>25</sup> Los datos corresponden únicamente a las estaciones de la línea 1 consideradas en la toma de datos (CU, CCU, P, VO, C).

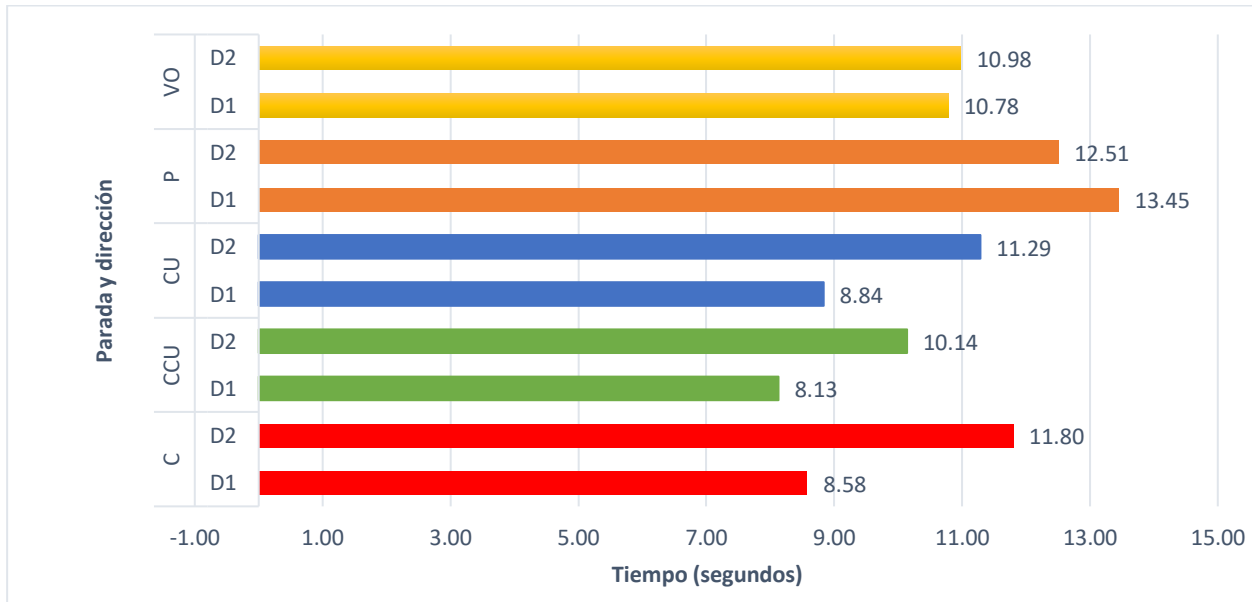


Gráfica 4-14 Cantidad promedio de pasajeros que acceden y descienden en 5 paradas de la línea 1 del Metrobús, Dirección D1.  
Fuente: Elaboración propia (2020).



Gráfica 4-15 Cantidad promedio de pasajeros que acceden y descienden en 5 paradas de la línea 1 del Metrobús, dirección D2.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

En cuanto al tiempo promedio que las unidades permanecen en cada estación se tiene la Gráfica 4-16. Podemos observar que las unidades permanecen mayor tiempo en Perisur que en el resto de las estaciones. Sin embargo, esta es la única estación en la que el tiempo de parada es mayor en la dirección D1 y no en D2.



Gráfica 4-16 Tiempo promedio de parada en 5 estaciones de la línea 1 del Metrobús.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

## 5 Propuesta y metodología

En el capítulo anterior se han descrito detalladamente las cinco zonas que conforman la región de estudio, la operación de camiones y de la línea 1 del Metrobús. Esta descripción nos permite comprender la manera en que los recorridos de UTP, al realizar demasiadas paradas provocan diversos puntos de congestión vehicular, principalmente en la calle Céfiro, Blvd. Adolfo López Mateos y la intersección de Av. Insurgente Sur con Av. Del Imán. El presente capítulo consta de dos secciones. En la primera se describe la propuesta de una alternativa de conexión entre CETRAM Universidad y la línea 1 del Metrobús. La segunda sección presenta los aspectos metodológicos referentes a la recolección y organización de información, así como a su procesamiento, el cual apoyó la descripción de la región de estudio (del capítulo anterior). Así mismo, el análisis de datos tiene como fin estimar los parámetros de entrada de los modelos de simulación que se desarrollan en este trabajo con el objetivo de analizar la viabilidad de la propuesta. Posteriormente, el siguiente capítulo presenta la estructuración de los modelos y la discusión de sus principales resultados.

### 5.1 Descripción de la propuesta

La propuesta considera ampliar la operación de UMB dentro de la región de estudio, ya que el Metrobús es un sistema que opera con autobuses de alta capacidad sobre carriles confinados que permiten traslados rápidos y seguros. Además, cuenta con estaciones fijas de plataforma elevada que permiten accesos y descensos rápidos a las unidades. En cuanto al peaje, cuenta con un sistema de prepago totalmente automatizado por medio de tarjetas inteligentes que reducen el tiempo de acceso. La tarjeta pertenece al programa de movilidad integrada por lo que puede ser adquirida y utilizada no solo en las instalaciones del Metrobús, sino en diversos puntos de cualquier sistema dentro del programa, como el STC Metro y el tren ligero.

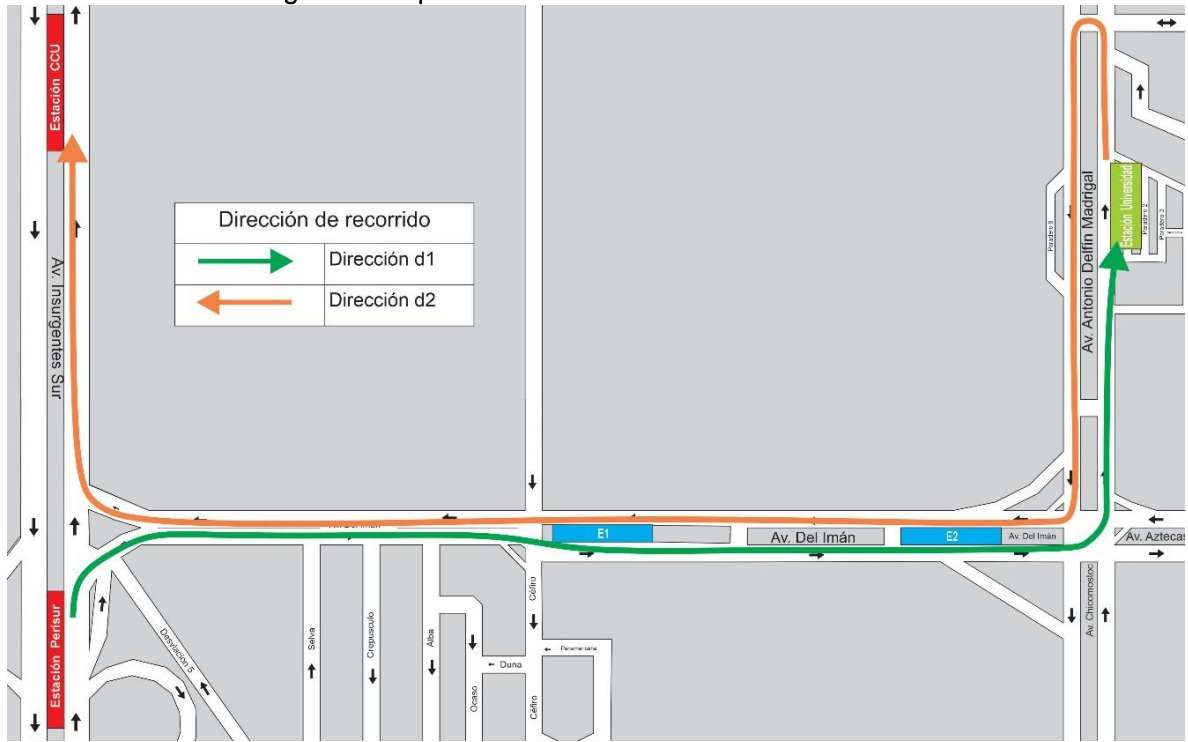
La **propuesta de este trabajo** consiste en aumentar a la línea 1 del Metrobús con dos nuevas conexiones hacia la línea 1 del STC Metro (Estación Universidad ubicada en CETRAM Universidad):

- Conexión d1: De la estación Perisur del Metrobús hacia CETRAM Universidad.
- Conexión d2: De CETRAM Universidad a la estación CCU del Metrobús.

Los recorridos propuestos son denotados con letras minúsculas para diferenciarlos de los recorridos en las actuales direcciones, D1 y D2, de la línea 1 del Metrobús. La extensión de recorrido propuesta será denotada por "**E**", y puede ser expresada como  $E = d1 + d2$ , ya que el punto final de d1 es el inicio de d2.

Considerando las paradas principales de las UTP's y la infraestructura existente en la región de estudio, se proponen dos nuevas estaciones del Metrobús (E1 y E2, ver Figura 5-1), ubicadas sobre las secciones más amplias de Av. Del Imán

Figura 5-1 Propuesta de extensión de la línea 1 del Metrobús.



Fuente: Elaboración propia (2020).

Una situación que motiva la propuesta anterior es que en la actualidad se han observado UMB articulados haciendo los recorridos d1 y d2, por lo que se sabe que la infraestructura actual de las calles y avenidas permiten el tránsito de las UMB (al menos de las UMB articulados, de dos vagones).

Se tiene la hipótesis de que estos recorridos se realizan cuando las unidades operando en la línea 1 requieren situarse en el estacionamiento ubicado en CETRAM Universidad (Figura 5-2), o viceversa, cuando una unidad es requerida para operación en la línea 1. También es posible que las unidades sean requeridas en otra línea del sistema y para alcanzar su destino, utilizan la infraestructura existente de la red, a partir de la línea 1.

Como evidencia de la situación descrita previamente se presenta la siguiente selección de fotografías de la Figura 5-3, donde se pueden observar UMB articulados transitando en las calles y avenidas de las Zonas 1 y 5 de la región de estudio.

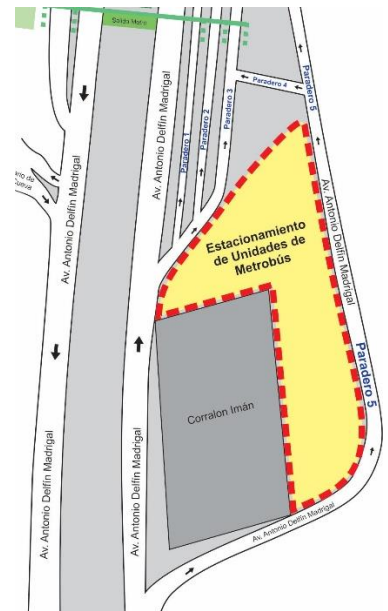


Figura 5-2 Ubicación del estacionamiento de unidades de Metrobús en CETRAM Universidad (Zona 1)

Fuente: Elaboración propia (2020).



Figura 5-3 Unidades de Metrobús transitando en calles y avenidas de la región de estudio.



UMB transitando en el paradero 1 de CETRAM Universidad. Fecha: 21 de octubre de 2019



UMB transitando en Av. Delfín Madrigal intersección con calle Jecuite (antes de retorno a<sup>26</sup>). Fecha: 06 de septiembre de 2019



UMB transitando sobre el retorno (a)<sup>26</sup> de Av. Delfín Madrigal. Fecha: 12 de septiembre de 2019



UMB transitando en Av. Delfín Madrigal (después del retorno a). Fecha: 12 de septiembre de 2019



UMB transitando en Av. Del Imán (cerca de la intersección con Av. Insurgentes Sur). Fecha: 12 de febrero de 2020



UMB transitando sobre Av. Del Imán, hacia Av. Insurgentes Sur. Fecha: 14 de febrero de 2020

*Selección de fotografías tomadas por la autora.*

De lo anterior, es posible observar que la infraestructura actual permite el tránsito de UMB, sin embargo, para conseguir rapidez y exclusividad en los carriles centrales de las Avenidas, es necesaria la inclusión de carriles confinados y algunas modificaciones en los cruces y ciclos semafóricos de la región de estudio, principalmente sobre Av. Del Imán.

La modificación más significativa necesaria para esta propuesta se presenta en la zona 3. Consiste en eliminar el cruce C2 y definir únicamente dos direcciones de tránsito entre C2 y C3, como lo indica la

<sup>26</sup> Para ver la ubicación del retorno a), dentro de la región de estudio, ver Figura 4-5, Descripción de la Zona 1 (página 42)



Figura 5-4. Además, para considerar carriles exclusivos en Av. Del Imán, también es necesario eliminar el resto de las conexiones entre ambos sentidos de la avenida.

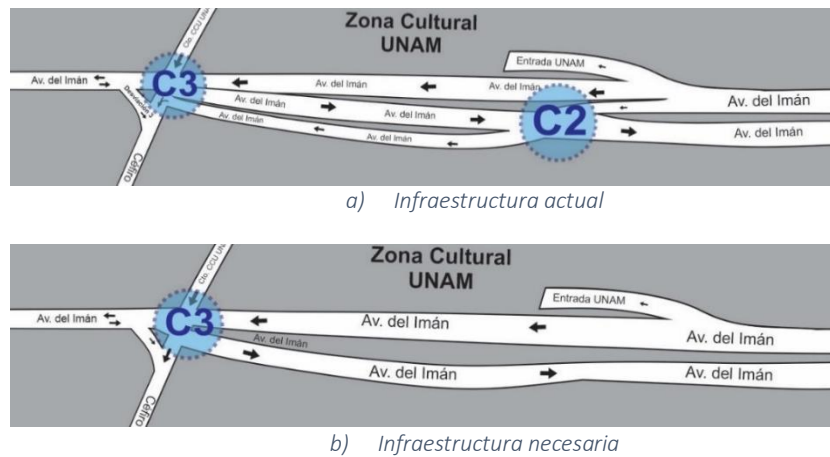


Figura 5-4 Modificación en la infraestructura sobre Av. Del Imán.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

La función principal de C2 consiste en separar el flujo vehicular de Av. Del Imán, dirección C2 –C3, y permitir el acceso a la calle Céfitro. Como consecuencia a la eliminación de C2 y los semáforos correspondientes, el ciclo semafórico de C3 debe modificarse. La Figura 5-5 muestra una propuesta del nuevo ciclo semafórico en C3, cuya duración es de 1:35 minutos y consta de tres fases que permiten la conexión entre calles y avenidas de manera similar a la situación actual.

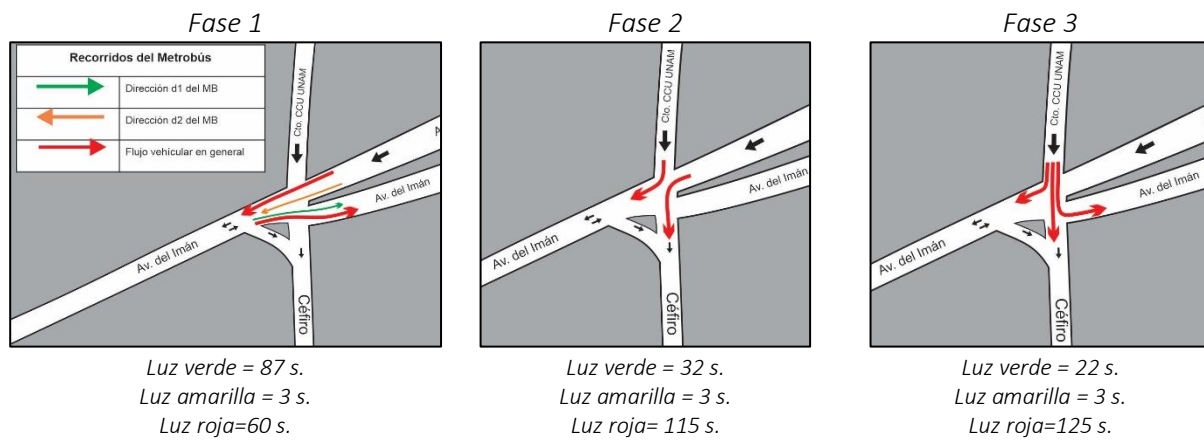


Figura 5-5 Propuesta de un nuevo ciclo semafórico con duración de 150 segundos en el cruce C3.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

- La *fase 1* permanece con la misma duración y contempla las dos direcciones de recorrido en Metrobús (ver fase 1, Figura 5-5).
- La *fase 2* permite el acceso a la calle céfiro. Su duración permanece igual que la fase 1 de C2 en la situación actual, considerando que habrá menor cantidad de unidades de transporte público pero el número de automóviles particulares aumentará debido a que Céfiro será la única calle de conexión entre Av. Del Imán (dirección C2-C3) y Blvd. Adolfo López Mateos.
- La *fase 3* tiene duración de 25 s, 10 s menos que la fase 2 de C3 actualmente. Esta reducción radica en que, de acuerdo con las observaciones realizadas, el flujo vehicular a partir del Centro Cultural UNAM es menor en comparación con el flujo en las dos fases anteriores.

Dos modificaciones similares suceden en C1 y en la intersección de Av. Insurgentes Sur y Av. Del Imán (C5<sup>27</sup>). En la primera, el ciclo semafórico permanece con las mismas fases<sup>28</sup> y los recorridos en Metrobús son considerados en la fase 2 (Figura 5-6). En C5, donde actualmente no existe ningún tipo de señalización con semáforos, se propone el ciclo semafórico de la Figura 5-7, que contempla los recorridos en Metrobús en la Fase 3.

Bajo esta propuesta, la línea 1 del Metrobús permitirá a los usuarios llegar a CETRAM Universidad desde distintos puntos de Av. Insurgentes y viceversa, usuarios que accedan en CETRAM Universidad podrán alcanzar puntos destino a lo largo de la línea.

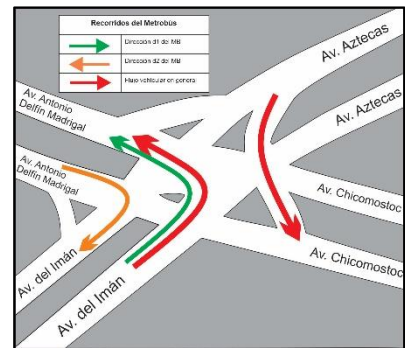


Figura 5-6 Modificaciones en la fase 2 del ciclo semafórico de C1.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

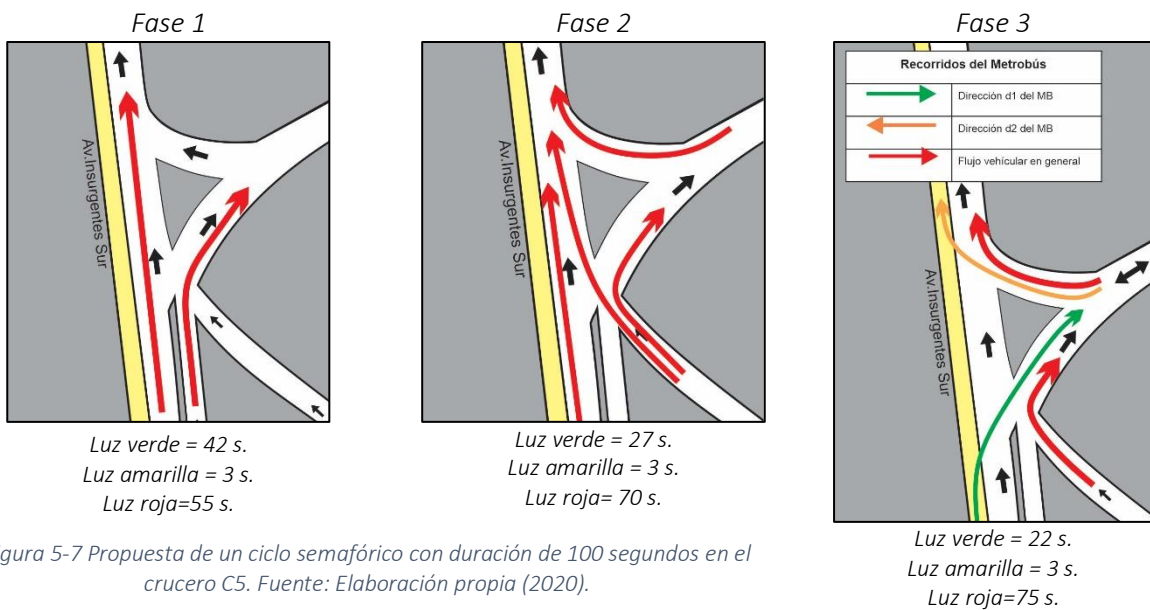


Figura 5-7 Propuesta de un ciclo semafórico con duración de 100 segundos en el cruce C5. Fuente: Elaboración propia (2020).

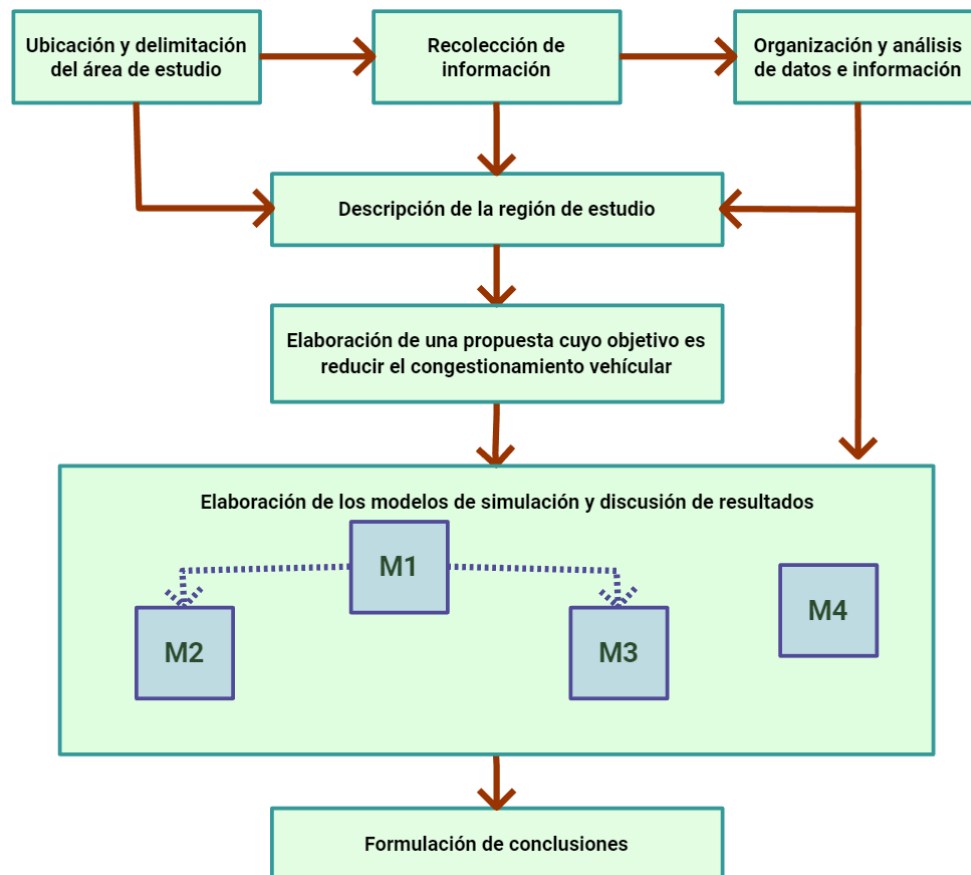
<sup>27</sup> La intersección entre Av. del Imán y Av. Insurgentes Sur será referida en adelante como Cruce 5 (C5).

<sup>28</sup> Para ver las cuatro fases del ciclo semafórico en C1, ver la Figura 4-10 (pág. 51)

## 5.2 Metodología

Para conocer la viabilidad de la propuesta anterior, este trabajo fue desarrollado conforme a la metodología que a continuación se describe. Consta de siete etapas que se relacionan de acuerdo con lo indicado en la Figura 5-8.

Figura 5-8 Metodología para analizar la viabilidad de la propuesta



Fuente: Elaboración propia (2020).

Notemos que la *descripción de la región de estudio* está relacionada con cuatro de las siete etapas, por lo que se considera una etapa muy importante. Sin una adecuada descripción de la región de estudio es imposible establecer las bases para los modelos de simulación, ya que no habrá puntos de referencia bien definidos para su validación. Por esta razón se ha presentado una extensa descripción de la región de estudio, utilizando un enfoque sistémico que nos permite identificar tanto los elementos del sistema como las relaciones e interacciones que existen entre ellos.

Los modelos de simulación M1, M2, M3 y M4 fueron desarrollados para analizar la viabilidad de la propuesta. El primer modelo, M1, tiene como objetivo estimar la demanda de pasajeros que actualmente realizan recorridos en UTP, entre la estación Perisur del Metrobús y CETRAM Universidad, así como la cantidad promedio de UTP operando por hora. Con el modelo M2 se estima el tiempo de recorrido de UMB

propuestos y con M3 se estima la cantidad de UMB necesarias para satisfacer la demanda actual de pasajeros. Por otro lado, el modelo M4 no se relaciona con ninguno de los modelos anteriores, sino que se trata de un modelo independiente cuyo objetivo es visualizar la interacción de vehículos en la situación actual y en la situación propuesta.

La descripción detallada de cada uno de los modelos y la discusión de sus resultados se presentan en el capítulo 6. Previamente, en la siguiente sección se presentan los aspectos metodológicos considerados en la recolección, organización y análisis de datos e información. Es importante mencionar que muchas de estas consideraciones fueron realizadas previamente a la descripción de la región de estudio, donde se presentaron datos de carácter cuantitativo. Sin embargo, son presentadas hasta este momento, con el objetivo de que, en este punto, el lector se encuentre familiarizado con la región de estudio y los términos que se definen en su descripción. Por otro lado, cabe mencionar que gran parte de los resultados del análisis de datos toman relevancia al definir los parámetros de entrada de los modelos de simulación.

### 5.2.1 Recolección y organización de datos e información

La mayor parte de la información fue recolectada en agosto, septiembre, octubre y noviembre del 2019, en un horario de 7:00 a 10: 00 am. La información obtenida corresponde principalmente a la operación actual de UTP, cuya base se ubica en CETRAM Universidad. Posteriormente, en febrero de 2020, se recolectó información correspondiente a la línea 1 del Metrobús.

Para obtener información se acudió a distintos métodos como entrevistas, toma de tiempos, observaciones y videogravaciones, así mismo se utilizaron diferentes herramientas y métodos de análisis, los cuales, son descritos en distintos capítulos de *Metodología de la investigación* (Sampieri, Fernández, & Bautista, 2010).

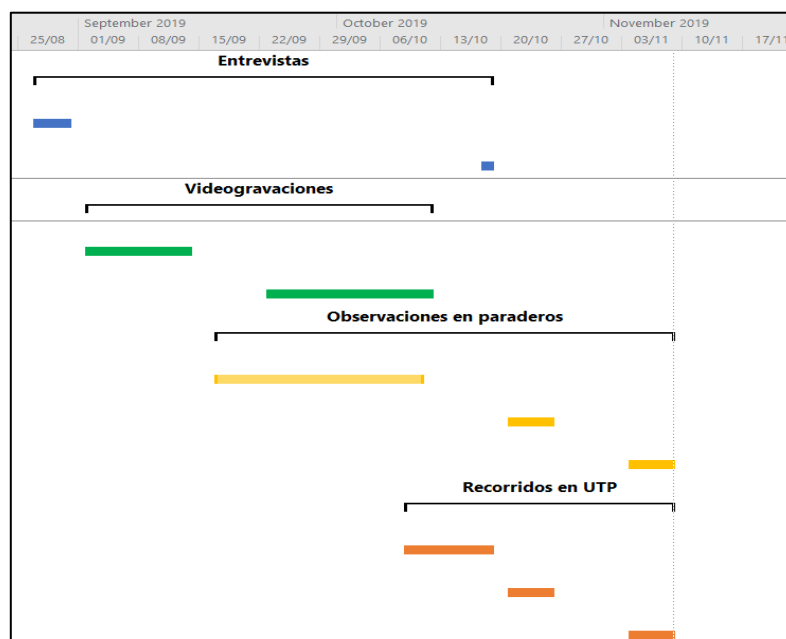


Figura 5-9 Primer periodo de recolección de información.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

El diagrama de la Figura 5-9 ilustra el primer periodo de recolección de datos, donde podemos observar que algunas actividades sucedieron simultáneamente. Por ejemplo, algunos sitios elegidos para realizar videograbaciones resultaron cercanos a los principales paraderos de UTP, entonces fue posible realizar observaciones y anotaciones por escrito mientras se tomaba el video. Por otro lado, los recorridos en UTP requeridos para traslados dentro de la región de estudio fueron aprovechados para obtener información al respecto. Sin embargo, el primer periodo correspondiente tanto a observaciones en paraderos como a recorridos en UTP se consideran de entrenamiento ya que en dicho periodo se elaboraron los formatos para las etapas posteriores.

A continuación, se presentan los aspectos más importantes en cada uno de los métodos, indicando las herramientas utilizadas, y la fecha precisa en cada caso.

### ❖ *Entrevistas*

Se realizaron entrevistas a los despachadores y choferes de las diferentes rutas con base en CETRAM Universidad y cerca de la estación Perisur del Metrobús, con el objetivo de obtener información acerca de la operación de rutas de transporte público. Los formatos utilizados para recolectar información se presentan en los anexos A y B.

Inicialmente se consideró la grabación de audios, con el objetivo de retener la mayor cantidad de información, sin embargo, las personas entrevistadas se declararon indispuestas o poco cooperativas, por lo que, esta opción fue descartada.

Por otro lado, debido a que los despachadores se encontraban en horario de trabajo, solían contestar rápidamente y sin entrar en detalles. Así mismo hubo quienes reservaron información por temor al mal uso que pudiera darse.

Las entrevistas se realizaron en dos periodos, dentro del horario de 07:00 am a 10:00am:

- Del 27 al 30 de agosto del 2019 en CETRAM Universidad, y
- El 18 de octubre de 2019 en Perisur.

### ❖ *Videograbaciones*

Como principales herramientas se utilizaron memorias microSD<sup>29</sup>, un tripie y cámaras de teléfonos celulares. La toma de videos se realizó de lunes a viernes de 07:00 a 10:00 am, durante 5 semanas y en dos periodos:

- Periodo 1: Del 02 al 13 de septiembre de 2019
- Periodo 2: Del 23 de septiembre al 11 de octubre de 2019

---

<sup>29</sup> Las tarjetas de memoria micro-SD, son pequeños dispositivos de almacenamiento digital especialmente utilizados en dispositivos portátiles.

Las videograbaciones se realizaron en un total de 32 puntos distribuidos en las 5 zonas de la región de estudio (ver Figura 5-10). Los puntos fueron seleccionados principalmente en las intersecciones de calles dentro de la región de estudio, así como en sitios de entrada y salida de flujo vehicular. Inicialmente, en cada zona se consideraron 6 puntos, pero luego se agregaron dos puntos más en la zona 4.

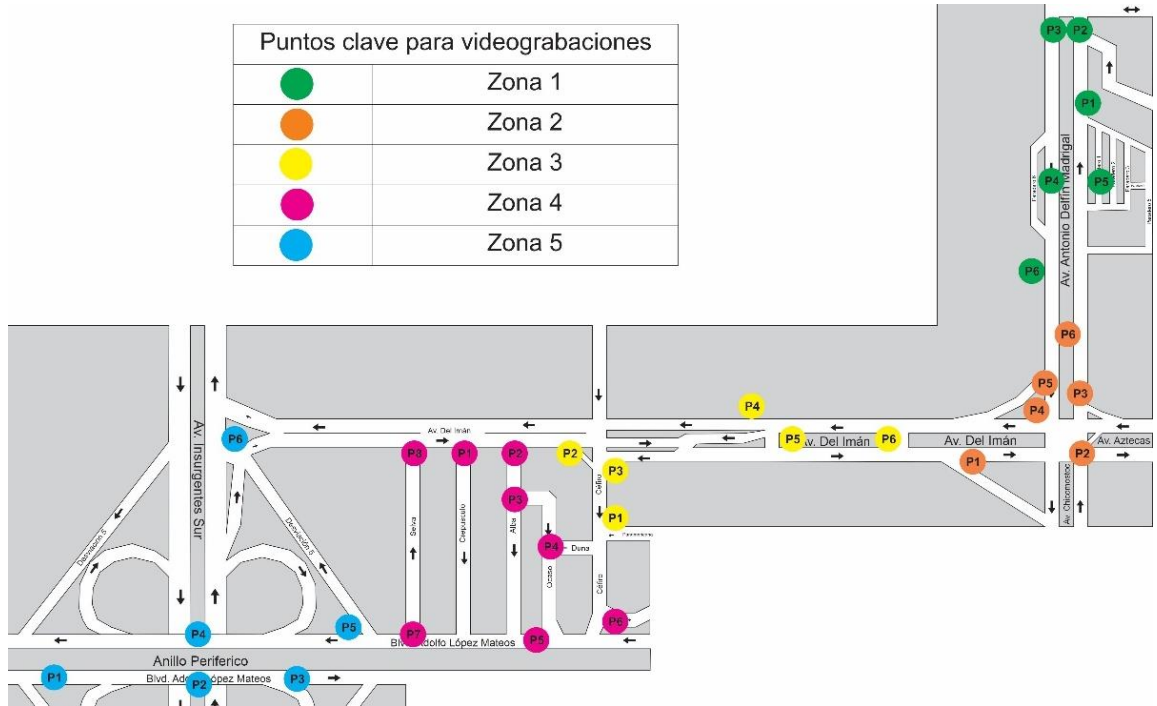


Figura 5-10 Puntos de ubicación para la toma de videograbaciones dentro de la región de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Dado que, en dicho horario, resulta difícil y poco productivo recorrer la región completa, las videograbaciones fueron tomadas considerando una zona por día, reduciendo los tiempos de traslado.

Para conseguir representatividad de la información, se estructuró un calendario. Dado que se estudiaron 5 zonas, a cada día de la semana (de lunes a viernes) se asignó una zona de tal manera que los cinco días de la semana se recolectara información de la región completa. El punto de inicio para comenzar las grabaciones de cada día fue elegido aleatoriamente con las herramientas de Excel, utilizando la numeración de puntos de la Figura 5-10.

Tabla 5-1 Calendario de toma de videograbaciones

Semana \ Día	Lunes		Martes		Miércoles		Jueves		Viernes	
	Zona	Punto	Zona	Punto	Zona	Punto	Zona	Punto	Zona	Punto
Semana 1	2	4	3	5	4	3	5	3	1	5
Semana 2	3	1	4	4	5	4	1	1	2	5
Semana 3	4	5	5	5	1	2	2	1	3	2
Semana 4	5	1	1	3	2	2	3	3	4	1
Semana 5	1	4	2	3	3	4	4	2	5	2

Fuente: Elaboración propia (2020).

El calendario de la Tabla 5-1 explica, por ejemplo, que el lunes de la semana 1, se tomaron videos en la zona 2, comenzando por el punto P4. Los puntos restantes de la zona se tomaron de forma ordenada, es decir, el siguiente punto en grabar fue P5, después P6, luego P1, P2 y P3. Análogamente, la zona y el punto de inicio del resto de los días de la semana fueron tomados ordenadamente.

La selección aleatoria de zona y punto en la primera semana definió el programa de las cinco semanas. De tal manera que el lunes de la semana 2 correspondió a la zona 3, el lunes de la semana 3, a la zona 4 y así sucesivamente hasta la quinta semana. Análogamente el punto de inicio en cada zona fue determinado por el punto de inicio en la semana anterior. Por ejemplo, las grabaciones del martes de la semana 2, iniciaron con el punto P4 puesto que en la semana 1 la zona 4 inició con P3.

Aunque existieron algunos inconvenientes a lo largo de la toma de datos, se trató de cumplir en medida de lo posible este programa. El principal objetivo de las videograbaciones fue obtener información del flujo vehicular, sin embargo, estar en las zonas por este periodo de tiempo permitió conocer de mejor manera la región de estudio, considerando situaciones de carácter cualitativo que permitieron interpretaciones relevantes para el diseño de los modelos de simulación.

#### ❖ *Observaciones en paraderos*

Las observaciones se hicieron en mayor medida en las paradas principales de los recorridos S1 y S2 de las rutas con estación terminal en CETRAM Universidad, pero dentro de las zonas 4 y 5 también se consideraron las rutas con terminal en CETRAM Taxqueña.

Las observaciones se realizaron en 3 periodos dentro de un horario de 07:00 am a 10:00 am de lunes a viernes:

- Periodo 1: Del 17 de septiembre al 10 de octubre de 2019. Este periodo corresponde a una prueba piloto. Sin embargo, registros completos fueron considerados en el análisis de los datos.
- Periodo 2: Del 21 al 25 de octubre de 2019.
- Periodo 3: Del 04 al 08 de noviembre de 2019.

En cada observación se consideró la ubicación de la parada, la ruta de la UTP, el tiempo que la UTP destina al ascenso y descenso de pasajeros (T), la cantidad de pasajeros que suben a la UTP (S) y la cantidad de pasajeros que bajan de la UTP (B).

El tiempo fue obtenido con aplicación para celular “Multi Cronometro y Temporizador” (Figura 5-11), la cual permite iniciar y parar varios cronómetros a la vez, lo que resultó útil ya que en ocasiones se observaron a dos o más UTP’s realizar parada simultáneamente en el mismo paradero.

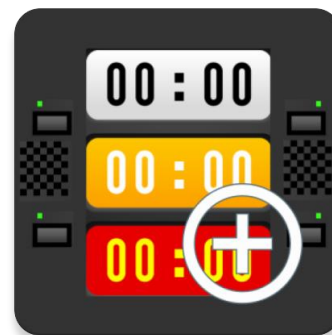


Figura 5-11 Aplicación “Multi Cronometro y Temporizador”

### ❖ *Recorridos en UTP*

Para obtener información acerca de la operación de UTP, se realizaron viajes en las distintas rutas que realizan los recorridos R4 y R5<sup>30</sup>, 38 viajes en el sentido S1 y 35 en el sentido S2. La toma de datos corresponde al periodo comprendido entre el 08 de octubre y 08 de noviembre del 2019, de lunes a viernes, en un horario de 07:00 am y 10:00 am. La Tabla 5-2 muestra el número de recorridos realizados en cada sentido y en cada ruta.

**Tabla 5-2 Número de recorridos por ruta, realizados para obtener información sobre la operación de las unidades de transporte público**

Ruta	Vehículos en operación <sup>31</sup>	Recorrido que realiza la ruta	Sentido del recorrido	
			S1	S2
40	CV, CM	4	7	1
60	CV	4	6	9
1.3	CM, M	4	10	9
111	CM	4	6	3
76	CV	5	0	4
112	CM	6	0	1
76.1	V	4	9	8
Total			38	35

Fuente: Elaboración propia (2020).

De la tabla anterior, observemos que en el sentido S1 no se realizaron recorridos en las rutas 76 y 112. Esto se debe a que dichas rutas utilizan vehículos similares de las rutas que operan con *camiones* (CV, CM) y su recorrido es más corto, porque inicia cerca del punto A1.1 (Figura 5-12), después de A1, donde comienza el recorrido de las demás rutas. Entonces, recorridos que inician desde A1 proporcionar información similar a la que se obtiene de los recorridos que inician en A1.1. Por otro lado, recorridos en vagoneta (en S1) si fueron considerados, ya que este el tipo de vehículo es bastante diferente y ninguna de las rutas que inicia en A1 opera con vagonetas.

Para los recorridos en sentido S2, si fueron consideradas las rutas R112 y R76, ya que, en este caso, el recorrido coincide en su totalidad.

En cada recorrido se buscó obtener información referente a la cantidad de pasajeros al inicio y fin del viaje y la duración total del viaje, así como algunos datos sobre las paradas solicitadas y el número de usuarios involucrados.

Para obtener tal información se utilizó la aplicación Oruxmaps que, para cada recorrido proporciona una tarjeta de información básica, como el tiempo total del viaje, la velocidad promedio y la velocidad máxima. Además, se realizaron registros de forma manual, utilizando los formatos que se ilustran en la Figura 5-13,

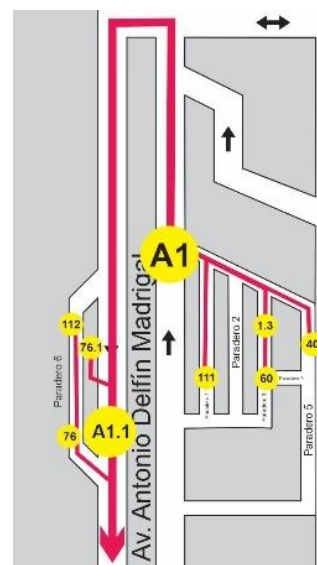


Figura 5-12 Inicio de recorridos en CETRAM Universidad  
Fuente: Elaboración propia (2020).

<sup>30</sup> Para ver los recorridos R4 y R5 en sentidos S1 y S2 ver págs. 74 y 75

<sup>31</sup> La categoría del vehículo en operación se encuentra en correspondencia a la definición de la Tabla 4-2 Categorías de los vehículos que operan las rutas de interés dentro de la región de estudio. (pág. 44)



así como un reloj digital para la toma tiempos entre puntos previamente definidos. La nomenclatura utilizada en los formatos corresponde a abreviaturas del nombre de las calles, cruceros o desviaciones, mencionadas en la descripción de zonas del capítulo 4.

Recorrido S1						Recorrido S2					
Fecha:						Fecha:					
Hora Inicio:	Parada	S	B	T(seg)	Ubicación	Hora Inicio:	Parada	S	B	T(seg)	Ubicación
Ruta:	Inicial=					Ruta:	Inicial E.P.=				
Camión:	R_a)=					Camión:	Imán_1=				
Tiempo Hasta:	D1=					Tiempo Hasta:	Imán_2=				
IDM=	Imán_1=					D3=	D3=				
R_a)=	Imán_2=					C3=	C3=				
P_76=	C2=					C2=	C2=				
D1=	EC=					D2=	Imán_1=				
C2=	Cef_1=					Salida Imán=	Imán_2=				
EC=	Cef_2=					Entrada DM=	D2=				
SC=	SC=					D_P5=	C1=				
ES=	ES=					Fin=	Fin=				
P=	P=										

Figura 5-13 Formatos utilizados en la toma de datos en recorridos sobre UTP's.

Fuente: Elaboración propia (2020).

**Nota:** S y B se refieren a la cantidad de pasajeros que suben y bajan de la UTP en cada parada.

El objetivo de extraer información desde diferentes fuentes es corroborarla y complementarla ya que en ocasiones se presentaron fallas en el desempeño de la aplicación o bien, los registros manuales resultaron incompletos debido a las malas condiciones en que se realizó el viaje. Por ejemplo, en unidades altamente ocupadas resultó difícil realizar apuntes y anotaciones por escrito.

Es importante mencionar que en los reportes de OruxMaps la información, tanto de tiempo como de distancia muestra un valor redondeado, por lo que constantemente se encontró diferencia con los datos obtenidos por el reloj y los formatos escritos. Sin embargo, la diferencia es mínima e información básica como tiempo, velocidad media, velocidad en movimiento y velocidad máxima fueron consideradas para el análisis cuantitativo de los recorridos de la sección 4.3.4 (*Duración y velocidad de los recorridos*, 84)



Figura 5-14 Ejemplo del reporte estadístico generado a partir de OruxMaps.

❖ **Observaciones en la línea 1 del Metrobús**

Para obtener información sobre la operación de la línea 1 del Metrobús se realizaron viajes en ambas direcciones de la línea, entre las estaciones Ciudad Universitaria, Centro Cultural Universitario, Perisur, Villa Olímpica, y Corregidora. Además, en las cinco estaciones, se realizaron conteos del número de usuarios que ascienden y descienden, considerando ambas direcciones de la línea. Las observaciones se realizaron del 07 al 14 de febrero del 2020, en un horario de 07:00 am a 10:00 am.

Los tiempos de recorrido entre estaciones fueron tomados con relojes digitales, cuyo manejo resultó favorable incluso en recorrido donde las UTP se encontraban saturadas. Para los tiempos de parada de la UMB se utilizó nuevamente la aplicación *Multi Cronometro y Temporizador*. Y, en ambos casos, los tiempos definidos por el reloj y la aplicación fueron registrados en formatos como los que muestra la Figura 5-15 donde el nombre de las estaciones fue abreviado con el objetivo de contar con un formato pequeño y manejable.

Fecha			Día				
Hora	Parada	Sentido	Tiempo de parada (s)	Vag	S	B	Tiempo sig. MB
	CU						
	CU						
	CU						
	CU						
	CU						
	CU						
	CU						
	CCU						
	CCU						
	CCU						
	CCU						
	CCU						
	CCU						
	P						
	P						
	P						
	P						
	P						
	P						
	VO						
	VO						
	VO						
	VO						
	VO						
	VO						
	C						
	C						
	C						
	C						
	C						
	C						

Tiempos de recorrido MB				
Fecha				
Hora	O	D	Sentido 2	
			T	O
	CU	CCU		
	CCU	P		
	P	VO		
	VO	C		

Fecha				
Hora	O	D	Sentido 1	
			T	O
	C	VO		
	VO	P		
	P	CCU		
	CCU	CU		

- Significado de abreviaturas de los formatos:**
- Vag: Vagones de la UMB
  - S/B: Pasajeros que suben/bajan en cada parada
  - Tiempo sig. MB: Tiempo entre la partida de una UMB y la llegada de otra.
  - O/D: Estación origen /destino del viaje
  - T: Duración del recorrido
  - O: Estimación de la Ocupación de la UMB donde se realiza el viaje.

Figura 5-15 Formatos utilizados en la toma de datos en la línea 1 del Metrobús.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

## 5.2.2 Procesamiento y análisis de datos e información

En la sección anterior fueron descritas las consideraciones respecto a la obtención de información. Ahora, en esta sección, se presenta la descripción general del manejo y almacenamiento de esta. Posteriormente se describen distintos métodos de análisis que proporcionaron información para la descripción de recorridos de UTP y UMB, así como para la estimación de los parámetros de los modelos de simulación.

### ❖ *Manejo y almacenamiento de datos referentes a tiempos, usuarios y paradas de recorridos.*

La mayoría de la información recolectada fue almacenada y analizada en hojas de Excel. Utilizando plantillas con encabezado que incluyen el lugar y fecha de donde los datos fueron recolectados. Aunque este tipo de información no resultó de gran utilidad para los intereses de este trabajo, si lo fue para rastrear el registro en formatos escritos y corregir errores de captura que pudieran afectar la interpretación de la información.

### ❖ *Manejo y almacenamiento de los archivos de Video*

Para organizar y analizar los videos de manera ordenada, estos fueron renombrados utilizando cinco bloques de información cuya separación es mediante un guión (-). Cada bloque de información corresponde a lo siguiente:

1. **Zona:** Denotado por la letra Z y el número de la zona (de acuerdo con la Figura 5-10, pág. 103)
2. **Punto de la zona:** Denotado por la letra P y la numeración del punto (de acuerdo con la Figura 5-10)
3. **Día de la semana:** Denotado por las dos primeras letras del día (LU, MA, MI, JU, VI)
4. **Fecha:** Denotado por dos dígitos para indicar el día, dos dígitos para indicar el mes y dos dígitos para indicar el año.
5. **Hora de inicio de la grabación:** Denotado por 4 dígitos, los dos primeros indican la hora y los otros dos, los minutos.

Este formato de renombramiento permite obtener información importante del archivo, sin necesidad de abrirlo en un reproductor de video. Por ejemplo, del video cuyo nombre es **Z4-P5-MA-100919-0712** podemos inferir que es un video correspondiente al punto 5 de la zona 4, que fue grabado el martes 10 de septiembre del 2019 a partir de las 07:12 am. Esta nomenclatura fue de gran utilidad para el manejo, ya que permite conocer a grandes rasgos el contenido del video, sin necesidad de abrir el archivo.

Posteriormente cada videograbación, fue segmentada en videos cortos de 3 minutos con el objetivo de extraer información precisa de cada segmento, así como de tener referencias específicas del archivo de donde fue obtenida tal información. Los videos de 3 minutos fueron agrupados en bloques de 6, con una portada que indica el inicio de cada corte, obteniendo videos de aproximadamente 18 minutos. Una vez que un video original fue segmentado, en su nombre se agregó un par de caracteres que permiten identificar los cortes que contiene. De esta manera, **C7-C12\_Z4-P5-MA-100919-0712** indica que el video Z4-P5-MA-100919-0712 fue segmentado en los cortes C7, C8, C9, C10, C11 y C12.

Cabe señalar que no todos los videos fueron analizados, ni el método de análisis fue igual en todos los casos. También es preciso mencionar que las videograbaciones fueron utilizadas de manera general como una fuente de información que puede ser visualizada ininidad de veces y se encuentra disponible en todo momento para complementar información respecto a la infraestructura de calles, edificios, características físicas de las UTP y movimiento vehículos en general.

A continuación, se presenta la principal información que fue extraída de videograbaciones y los puntos correspondientes al análisis (indicado la zona y el punto). Posteriormente en el resto de la sección se presenta la manera en que dicha información fue extraída.

- Intervalo de salida de las rutas desde su paradero en CETRAM Universidad (Zona 1: P1)
- Intervalo de llegada de los UTPs a la región de estudio al punto donde comienzan el recorrido S2, hacia CETRAM universidad (Zona 5: P6)
- Infraestructura de calles y flujo vehicular en puntos de entrada, salida e intersección de las zonas 3, 4 y 5 (Zona 3: P1, P2, P3, P4; Zona 4: P1, P4, P5, P6 y P7; Zona 5: P4 y P5)

En el resto de la sección se expone el modo en que los datos fueron analizados con el objetivo de obtener información cuantitativa para la descripción de recorridos (en UTP y UMB), así como los parámetros de entrada de los modelos de simulación.

#### ❖ *Tiempo, distancia y velocidad media de recorridos*

Tanto en recorridos realizados por UTP como por UMB, la distancia fue obtenida con la herramienta *Medir distancia* de Google Maps. Cabe mencionar que tales distancias son meras aproximaciones ya que existen diversos factores que impiden referirse a magnitudes de distancia exactas, por ejemplo:

- Las mediciones siempre tienen un factor de error y aun considerando que los instrumentos de medición funcionan de manera correcta, el valor obtenido como resultado es tan solo una aproximación ya que la magnitud de interés no es posible conocerla (Oda, 2013)
- La ubicación del inicio/fin de recorridos no está estrictamente definido para cada ruta. Se puede aproximar dentro de una zona, pero no en una ubicación estrictamente definida.
- Se ha observado que las unidades de transporte público a lo largo de sus recorridos zigzaguean a lo ancho de las vialidades, pasando de un carril a otro, por lo que la distancia total de recorrido no coincide con la distancia medida en línea recta desde el punto de inicio hasta el punto final.

Por otro lado, para la descripción de los recorridos de las UTP se obtuvo información del tiempo de recorrido a partir de dos fuentes (reloj digital y aplicación OruxMaps) y como dato representativo se consideró el promedio de ambos. Con estos datos y las distancias definidas para S1 y S2 se calculó la velocidad media.

En cuanto a los recorridos en UMB, primero se obtuvo la velocidad media considerando tiempos y distancias diferentes en cada dirección de la línea. Posteriormente se tomó como dato representativo de cada sección, el promedio de las velocidades, considerando ambas direcciones de la línea.

❖ **Tiempo entre el inicio de dos recorridos consecutivos de una misma ruta.**

Para obtener información respecto al inicio de recorridos en el sentido S1 y S2 se analizaron las videograbaciones de los puntos P1 de la Zona 1 y P6 de la Zona 5. De cada video se obtuvo información precisa del momento en que las UTP's se sitúan sobre un punto de referencia (un poste, una banqueta, la intersección de dos calles, etc). Un ejemplo de las plantillas que se utilizaron para extraer dicha información se ilustra en la Figura 5-16.

Considerando la ruta de cada UTP es posible definir el tiempo transcurrido desde la última UTP de la misma ruta y con ello se obtuvo el tiempo entre dos salidas consecutivas de la misma ruta.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Salida de CETRAM CU											
2	Dato	Fecha	Día	Corte	Número de Portad	Momento entrad	Tiempo entra	Tiempo entrada sin portada	Tipo camión	Ruta	Letrero	Ocupación
3	1	25/09/2019	MI	C1	1	00:43	43	40	RTP_Verde	RTP	NE	vacio
4	2	25/09/2019	MI	C1	1	00:49	49	46	V	R45	Estadio Azteca	0
5	3	25/09/2019	MI	C1	1	01:04	64	61	CM	R1.1	Gran Sur	
6	4	25/09/2019	MI	C1	1	01:27	87	84	CV	R60P		0
7	5	25/09/2019	MI	C1	1	01:32	92	89	CM	R1.1	Gran Sur	lleno
8	6	25/09/2019	MI	C1	1	01:42	102	99	VB	R29		vacio
9	7	25/09/2019	MI	C1	1	01:45	105	102	VV	R95		vacio
10	8	25/09/2019	MI	C1	1	01:52	112	109	M	R1.3		
11	9	25/09/2019	MI	C1	1	02:08	128	125	CV	R40		
12	10	25/09/2019	MI	C1	1	02:16	136	133	VV	R95		vacio
13	11	25/09/2019	MI	C1	1	02:19	139	136	VV	R95		vacio
14	12	25/09/2019	MI	C1	1	02:22	142	139	CV	R76		vacio
15	13	25/09/2019	MI	C1	1	02:24	144	141	CV	R60P		vacio
16	14	25/09/2019	MI	C1	1	02:29	149	146	VB	R29		vacía
17	15	25/09/2019	MI	C1	1	02:32	152	149	VB	R29		con pasaje
18	16	25/09/2019	MI	C1	1	02:39	159	156	VV	R95		vacía
19	17	25/09/2019	MI	C1	1	02:44	164	161	VV	R95		
20	18	25/09/2019	MI	C1	1	02:52	172	169	VV	R95		vacía
21	19	25/09/2019	MI	C1	1	02:54	174	171	VV	R95		con pasaje
22	20	25/09/2019	MI	C2	2	03:00	180	174	CV	R60		
23	21	25/09/2019	MI	C2	2	03:12	192	186	VBV		RUTA NO ESPECIFIC	vacía
24	22	25/09/2019	MI	C2	2	03:49	229	223	CM	R1.1		
25	23	25/09/2019	MI	C2	2	03:53	233	227	CV	R76		vacía
26	24	25/09/2019	MI	C2	2	03:55	23	17	VV	R95		vacía
27	25	25/09/2019	MI	C2	2	04:08	248	242	VV	R95		NO SE VE
28	26	25/09/2019	MI	C2	2	04:21	261	255	VV		RUTA NO ESPECIFIC	NO SE VE
29	27	25/09/2019	MI	C2	2	04:40	280	274	VB		NO DICE QUÉ RUTA	con pasaje
30	28	25/09/2019	MI	C2	2	04:44	284	278	CV	R60P		
31	29	25/09/2019	MI	C2	2	05:38	338	332	VV	R95		vacía
32	30	25/09/2019	MI	C2	2	05:50	350	344	VV	R95		vacía
33	31	25/09/2019	MI	C3	3	06:03	363	354	CM	R40		con pasaje
34	32	25/09/2019	MI	C3	3	06:04	364	355	CV	R76		
35	33	25/09/2019	MI	C3	3	06:13	373	364	VV		NO DICE QUÉ RUTA ES	
36	34	25/09/2019	MI	C3	3	06:16	376	367	VB	R76.1		vacía
37	35	25/09/2019	MI	C3	3	06:18	378	369	CV	R76		vacía
38	36	25/09/2019	MI	C3	3	06:19	379	370	VV		NO DICE QUÉ RUTA ES	
39	37	25/09/2019	MI	C3	3	07:09	429	420	CV	R60		con pasaje
40	38	25/09/2019	MI	C3	3	07:12	432	423	VV	R95		con pasaje
41	39	25/09/2019	MI	C3	3	07:16	436	427	VB	R45		vacía

Figura 5-16 Ejemplo de la plantilla utilizada para extraer información referente al inicio de recorridos a partir de videograbaciones.

Fuente: Elaboración propia (2020).

Para conocer el comportamiento de los datos se realizaron pruebas de ajuste estadístico siguiendo un procedimiento similar al del APENDICE A: AJUSTE DE DATOS, donde, distribuciones como la exponencial, normal y gamma resultaron representaciones adecuadas de los datos. Sin embargo, cuando se trató de un conjunto de pocos datos se optó por utilizar la distribución beta. Tal es el caso de la ruta R111 cuyo ajuste se describe detalladamente en el APENDICE B: DISTRIBUCIÓN BETA.

La Tabla 5-3 muestra un ejemplo del formato utilizado para especificar los parámetros y la función de probabilidad que describen un conjunto de datos, como caso particular, el tiempo entre el inicio de dos recorridos consecutivos de la ruta R111.

**Tabla 5-3 Tiempo entre el inicio de dos recorridos consecutivos de la ruta R111 en el sentido S1.**

Ruta	Función	Parámetros	Estadísticas básicas
R111	Beta	Forma (alfa)= 4.357 Escala(beta)= 3.5483 Moda= 9.47	Mínimo= 1.730 Máximo= 15.150 Media= 8.12 Mediana= 9.47

*Fuente: Elaboración propia (2020).*

❖ **Porcentaje de ocupación de las UTP al inicio de los recorridos.**

El porcentaje de ocupación de una UTP fue definido en cada recorrido a partir de las siguientes variables:

**CS** = Capacidad de pasajeros sentados (esta cantidad varía en cada UTP, incluso en UTP del mismo tipo).

**CP** = Capacidad de pasajeros parados (es una cantidad fija, estimada a partir de las observaciones en recorridos y la información proporcionada por choferes y checadores de las rutas en CETRAM Universidad).

**P**=Pasajeros a bordo.

$$\text{Porcentaje de ocupacion} = \frac{100 \times P}{\text{Capacidad total de la UTP}} = \frac{100 \times P}{(CS + CP)} \quad (2)$$

Por ejemplo, en los camiones de tipo CV se consideran 30 espacios disponibles para transportar a personas paradas. Si en un recorrido un camión del tipo CV dispone de 29 asientos, y la ocupación es de 35 pasajeros, el porcentaje de ocupación es  $59.32 = \frac{100 \times 35}{100 \times (29 + 30)}$ .

El porcentaje de ocupación al inicio de los recorridos en sentido S1, se consideró distribuido uniformemente entre el porcentaje mínimo y máximo observado en los recorridos de cada ruta. En el caso S2, se observó gran diferencia entre el porcentaje mínimo y máximo de ocupación. Dado que existen pocos datos respecto a cada ruta, se optó por considerar una categoría "CV" conformada por las rutas que operan con camiones del tipo CV (R60, R40, y R76). En esta categoría fue posible identificar un valor porcentual modal por lo que el porcentaje de ocupación al inicio del recorrido se modeló con una distribución beta a partir de los valores mínimo, máximo y modal.

Es importante recordar que los recorridos en sentido S1 influye considerablemente el hecho de que cada ruta tiene destinos diferentes, mientras que en S2 todas las rutas tiene como punto destino a CETRAM Universidad.

#### ❖ *Pasajeros que suben y bajan en cada parada.*

Para estimar el número de pasajeros que suben y bajan de las UTP en cada parada, se consideraron los datos de las observaciones realizadas en las paradas principales<sup>32</sup> en cada sentido de los recorridos.

Los datos se analizaron considerando dos categorías:

- 1) Paradas realizadas por camiones (de cualquier tipo: CV, CM o M). Los datos se analizaron conjuntamente considerando todas las UTP que realizaron parada, sin distinguir la ruta.
- 2) Paradas realizadas por vagonetas. Debido a que la cantidad de datos obtenidos en las observaciones en paradas fue mínima, la información se complementó considerando las paradas observadas en los recorridos realizados en vagonetas.

El procedimiento que se utilizó para definir los parámetros y la función de probabilidad que describen adecuadamente los datos, se describe detalladamente en el APENDICE A: AJUSTE DE DATOS (Utilización de la parada)

#### ❖ *Flujo de vehículos en calles y avenidas de la zona 3, 4 y 5*

El flujo de vehículos se obtiene a partir del análisis de los videos correspondientes a puntos de entrada, salida e intersección de calles. De cada punto se analizaron 20 cortes, que corresponde a una hora de grabación y los datos obtenidos fueron utilizados como parámetros de entrada del modelo M4. El análisis de flujo vehicular consiste en contar la cantidad de vehículos que entran o salen de las calles de la región de estudio, pasando por un punto fijo de referencia (un poste, una banqueta, un paradero, la intersección de calles, etc.). En el conteo se consideraron 7 categorías de vehículos:

- C** Camiones de transporte público de cualquier tipo y color
- V** Vagonetas de transporte público
- T** Taxis
- CP** Camiones particulares o escolares
- VP** Vagonetas particulares
- M** Motocicletas
- O** Otro tipo de vehículo, diferente a las categorías anteriores, como ambulancias, patrullas y camiones de carga.

El registro de conteos se organizó en hojas de Excel, como lo ilustra la Figura 5-17 . Cada fila corresponde a un corte (video de 3 minutos) y especifica el día y fecha del video, con el objetivo de conocer la fuente de información original. Este tipo de análisis se realizó en 9 puntos de las zonas 3, 4 y 5, que corresponde a un total de 9 horas de videograbaciones.

---

<sup>32</sup> Las paradas principales de los recorridos R4 y R5, realizados por camiones y vagonetas son presentados en la sección 4.3.2 Paradas de los recorridos (pág. 79)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
1	<b>Z3_P1</b>																			
2	<b>Entrada Panamericana</b>																			
3																				
4	Corte C	Fecha	Día de la semana	De Panamericana a Duna								De Panamericana a Céfiro								
C				V	T	P	CP	VP	M	O	C	V	T	P	CP	VP	M	O		
6	1	03/09/2019	MA	0	0	2	20	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
7	2	03/09/2019	MA	0	0	4	15	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
8	3	03/09/2019	MA	0	0	5	9	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0
9	4	03/09/2019	MA	0	0	4	16	0	1	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
10	5	03/09/2019	MA	0	0	1	6	0	0	1	1	1	0	1	4	0	0	0	0	0
11	6	03/09/2019	MA	0	0	1	17	0	0	3	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0
12	7	09/09/2019	LU	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
13	8	09/09/2019	LU	0	0	1	10	0	0	0	0	1	0	0	3	0	0	0	0	0
14	9	09/09/2019	LU	0	0	3	15	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0
15	10	09/09/2019	LU	0	0	3	9	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0
16	11	09/09/2019	LU	0	0	0	15	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0
17	12	09/09/2019	LU	0	0	2	21	0	0	0	1	2	0	0	3	0	0	0	0	0
18	13	27/09/2019	VI	0	0	2	8	0	0	0	0	1	0	1	5	0	0	0	0	0
19	14	27/09/2019	VI	0	0	3	21	0	0	0	0	1	0	4	4	0	0	0	0	0
20	15	27/09/2019	VI	0	0	4	10	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
21	16	27/09/2019	VI	0	2	2	18	0	0	1	0	1	0	0	6	0	0	0	0	0
22	17	27/09/2019	VI	0	0	3	24	0	0	0	1	0	1	1	3	0	0	0	0	0
23	18	27/09/2019	VI	0	1	6	15	0	1	2	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0
24	19	03/10/2019	JU	0	1	3	20	0	0	1	1	1	0	0	7	0	0	0	0	0
25	20	03/10/2019	JU	0	0	0	19	0	0	1	0	0	0	1	4	0	0	0	0	0
26	Totales=			0	4	49	298	0	2	15	4	10	1	12	61	0	0	3	0	
27	Otros=			357 Sin camiones, ni motos								74 Sin camiones, ni motos								
28	% Otros=			82.83 Sin camiones, ni motos								17.17 Sin camiones, ni motos								

Figura 5-17 Organización de la información obtenida de videograbaciones (Z3\_P1)  
Fuente: Elaboración propia (2020).

La corta duración de las videograbaciones permite mantener la concentración en el conteo, evitando errores que impliquen comenzar nuevamente el análisis. Por otro lado, la clasificación de vehículos permite establecer puntos de referencia que resultan útiles para actualizar los registros del documento de Excel.



## 6 Construcción y discusión de los modelos

En este capítulo se describe el desarrollo de los 4 modelos de simulación que se implementaron para evaluar la viabilidad de la propuesta. Cada modelo es presentado bajo la siguiente estructura:

- Descripción General
- Propósitos
- Modelo conceptual
- Supuestos y consideraciones
- Parámetros de entrada
- Estructura del modelo de simulación
- Resultados de modelo
- Validación y verificación
- Análisis y discusión de resultados

En la descripción general se describen las características técnicas del modelo, su clasificación de acuerdo con el método de implementación y la plataforma que se utilizó. En los supuestos y consideraciones se plantean las características del sistema modelado que implican simplificaciones. Los parámetros de entrada se presentan como conjuntos de datos, sin mencionar los detalles acerca del modo en que estos fueron obtenidos, ya que previamente, en la sección anterior se han discutido dichos aspectos metodológicos. Después de la estructura de la simulación se presenta el formato de los resultados que se obtienen y cómo son utilizados para la verificación y validación de este. Finalmente, se presenta un análisis de resultados y su discusión.

### 6.1 Modelo M1

#### Descripción General

El modelo M1 tiene como objetivo principal estimar la demanda actual de pasajeros que utilizan las UTP entre la estación Perisur y CETRAM Universidad. Dado que existen seis rutas involucradas con distintos parámetros de operación, el modelo fue desarrollado en la plataforma de Python, donde es posible implementar fácilmente sentencias<sup>33</sup> simples y de control (como ciclos y condicionales). Este modelo de simulación se clasifica como un *modelo de eventos discretos*, cuyo sistema envuelve los recorridos y las paradas principales que realizan las UTP. Las UTP's representan las entidades fluyendo en el sistema. Las variables de estado se definen a partir de la ubicación de la UTP en las paradas principales y se modifican de manera instantánea cuando una UTP pasa de una parada a otra. La condición de paro de este modelo es mediante un parámetro de entrada que define el tiempo de simulación (en horas).

El modelo simula los recorridos R4 y R5<sup>34</sup> de UTP, considerando sus principales paradas<sup>35</sup>. Se recolectan estadísticas referentes al número de pasajeros que abordan y descienden en cada parada, así como el

---

<sup>33</sup> Las sentencias son indicaciones que un programa ejecuta de manera secuencial.

<sup>34</sup> Para ver el recorrido R4 y R5 ver pag. 74

<sup>35</sup> Las paradas principales de los recorridos R4 y R5 son descritas en la sección 4.3.3 Propósito de paradas principales (pág. 81)

número de UTP's operando en periodos de una hora. En el sentido S1 se consideraron 7 paradas y 4 en S2. Se aclara que en este modelo no se está interesado en la duración de los recorridos, sino, únicamente en los pasajeros y en las UTP's. Para familiarizarse con el modo de operación de las rutas involucradas, se recomienda revisar previamente la sección 4.3 Operación de las rutas de transporte público (pág. 70)

### Propósitos

- I. Estimar la demanda de pasajeros que viajan en el sentido S1 y S2 en la ruta 40, 60, 1.3, 111, 76 y 76.1 en periodos de una hora.
- II. Identificar la sección de máxima carga de las UTP's.
- III. Estimar el número de UTP's que circulan por hora en cada sentido del recorrido.

### Modelo conceptual

El modelo conceptual es respecto al recorrido de las diferentes rutas en los sentidos S1 y S2. En el sentido S1, el recorrido coincide para las rutas R40, R60, R1.3 y R111 que tienen la posibilidad de realizar siete paradas (denotadas por la letra "P" mayúscula, Figura 6-1). Mientras tanto, la ruta R76 no tiene la posibilidad de realizar parada en P1, ya su recorrido inicia después de dicha parada. El resto de las paradas coinciden con las otras rutas (Figura 6-2).

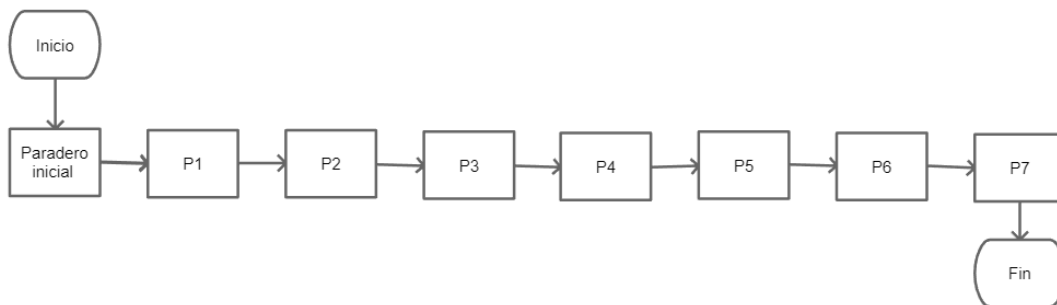


Figura 6-1 Recorrido de las rutas R40, R60, R111 y R1.3 en el sentido S1  
Fuente: elaboración propia (2020).

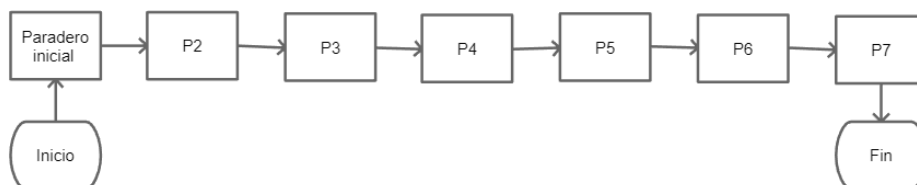


Figura 6-2 Recorrido de la ruta R76 en el sentido S1.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Por otro lado, la ruta R76.1 tiene un recorrido diferente (Figura 6-3) en donde solo se consideran cuatro paradas, denotadas con la letra “p” minúscula.

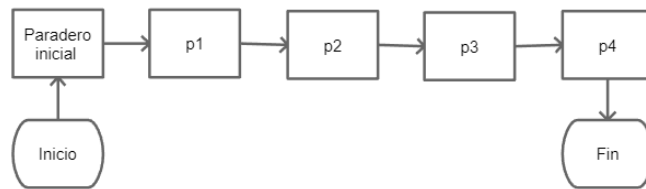


Figura 6-3 Recorrido de la ruta 76\_1 en el sentido S1.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

En cuanto al modelo conceptual del recorrido en sentido S2, se tiene el diagrama de la Figura 6-4 para las rutas R40, R60, R1.3, R111 y R76, con cuatro paradas denotadas por la letra Q, y la última parada que se realiza en los paraderos de CETRAM Universidad, donde todos los pasajeros desocupan la UTP. El modelo conceptual de S2 correspondiente a la ruta R76.1 se ilustra en la Figura 6-5.

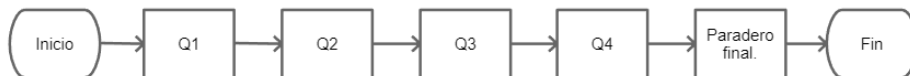


Figura 6-4 Recorrido de las rutas R40, R60, R1.3, R111 y R76 en el sentido S2.  
Fuente: Elaboración propia (2020).



Figura 6-5 Recorrido de la ruta R76.1 en el sentido S2.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

### Supuestos y consideraciones

- En este modelo se consideran únicamente las paradas principales de los recorridos.
- Se consideran cuatro tipos de vehículos:
  - ✓ Tres tipos camión: Camión Verde (CV), Camión Morado (CM), Camión morado Grande (CMG) y Micro (M)
  - ✓ Vagonetas
- Los recorridos realizados por camiones (de cualquier tipo) son semejantes.
- Los recorridos realizados por vagonetas son diferentes a los realizados por camiones, por lo tanto, se consideran paradas diferentes.

- La ruta 1.3 opera con dos tipos de vehículos: CM y M. El 40% de los recorridos son operados en vehículos del tipo CM y 60% en tipo M<sup>36</sup>.
- La ruta R111 opera con vehículo CM y CMG. De acuerdo con las observaciones realizadas a partir de los recorridos en la ruta R111, se estima que el 90% de los recorridos son operados por vehículos del tipo CM.
- En la ocupación de las UTP se considera que si existen uno o más pasajeros parados es porque todos los asientos están ocupados. Es decir, que primero son ocupados todos los asientos y posteriormente los espacios para pasajeros parados. (Esta es una situación que en el sistema real no sucede ya que hay pasajeros que prefieren viajar de pie aun cuando existen asientos disponibles).

## Parámetros de entrada

Los parámetros de entrada de este modelo son los siguientes:

- 1- El tipo de vehículo con los que opera cada ruta y la capacidad se presenta en la Tabla 6-1. Recordemos que existen vehículos del mismo tipo con distinta cantidad de asientos, por lo que, en el modelo, la capacidad para pasajeros sentados se define con la distribución uniforme discreta, considerando la cantidad mínima y máxima de asientos observados en las UTP donde se realizaron los recorridos.

**Tabla 6-1 Capacidad de los vehículos en operación, por ruta.**

Ruta	Tipo de vehículo	Capacidad		
		Mínimo de asientos	Máximo de asientos	Parados
R40	CV	29	33	30
R60	CV	27	35	30
R1.3	M=60%	18	24	20
R1.3	CM=40%	31	36	33
R111	CM=90%	31	37	33
R111	CMG=10%	45	45	40
R76.1	CV	29	33	30
R76.2	V	16	20	5

*Fuente: Elaboración propia (2020).*

- 2- El porcentaje de ocupación de cada UTP<sup>37</sup> al inicio de los recorridos. En S1 se consideró una distribución uniforme, definida por los valores porcentuales mínimo y máximo de la Tabla 6-2. En S2 se consideró una distribución beta obtenida a partir de los valores porcentuales mínimo, máximo y modal (Tabla 6-3).

<sup>36</sup> Esta consideración surge a partir de la clasificación de UTP de la ruta 1.3, observadas en las videograbaciones de del punto P1 de la zona 1 y P5 de la zona 2.

<sup>37</sup> La manera de calcular el valor porcentual fue presentada en la pág. 111

**Tabla 6-2 Porcentaje de ocupación al inicio del recorrido S1.**

Ruta	% Mínimo	% Máximo
R40	10	60
R60	60	85
R1.3-M	10	45
R1.3-CM	10	33
R111	35	80
R76	70	95
R76.1	75	100

Fuente: Elaboración propia (2020).

**Tabla 6-3 Porcentaje de ocupación al inicio del recorrido S2.**

Rutas	% Mínimo	% Modal	% Máximo
R40	5	50	75
R60	5	50	75
R1.3-M	10	50	75
R1.3-CM	5	40	50
R111	40	50	75
R76	5	50	75
R76.1	0	35	85

Fuente: Elaboración propia (2020).

- 3- El tiempo entre el inicio de dos recorridos consecutivos en el mismo sentido, por ruta. Este parámetro es definido por una distribución de probabilidad (Tabla 6-4 y Tabla 6-5).

**Tabla 6-4 Tiempo entre el inicio de dos recorridos consecutivos en el sentido S1, por ruta.**

Ruta	Función	Parámetros	Estadísticas básicas
R111	Beta	Forma (alfa)= 4.357 Escala(beta)= 3.5483 Moda= 9.47	Mínimo= 1.730 Máximo= 15.150 Media= 8.12 Mediana= 9.47
R40	Normal	Ubicación= 4.21 Escala= 2	Mínimo= 0.833 Máximo= 7.710 Media= 4.210 Mediana= 4.480
R76	Normal	Ubicación= 2.94 Escala= 1.32	Mínimo= 0.5500 Máximo= 5.5300 Media= 2.9400 Mediana= 2.7900
R76.1	Beta	Forma (alfa)= 3.025 Escala(beta)= 4.593 Moda= 2.45	Mínimo= 0.860 Máximo= 5.466 Media= 2.73 Mediana= 2.450
R60	Beta	Forma (alfa)= 2.96 Escala(beta)= 4.61 Moda= 3.31	Mínimo= 0.180 Máximo= 9.480 Media= 3.21 Mediana= 3.31
R1.3	Beta	Forma (alfa)= 4.357 Escala(beta)= 3.5483 Moda= 4	Mínimo= 0.050 Máximo= 5.580 Media= 2.50 Mediana= 2.70

Fuente: Elaboración propia (2020).

Tabla 6-5 Tiempo entre el inicio de dos recorridos consecutivos en el sentido S2, por ruta.

Ruta	Función	Parámetros	Estadísticas básicas
R111	Beta	Forma (alfa)= 4.41 Escala(beta)= 3.45 Moda= 10.34	Mínimo= 2.98 Máximo= 15.43 Media= 9.84 Mediana= 8.22
R40	Beta	Forma (alfa)= 3.298 Escala(beta)= 4.49 Moda= 4.31	Mínimo= 0.18 Máximo= 10.90 Media= 4.55 Mediana= 4.31
R76	Gamma	Forma= 1.688 Escala= 1.114	Mínimo= 0.13 Máximo= 6.51 Media= 1.18 Mediana= 1.65
R76.1	Beta	Forma (alfa)= 4.526 Escala(beta)= 3.215 Moda= 12.1	Mínimo= 4.10 Máximo= 16.86 Media= 11.11 Mediana= 12.10
R60	Exponencial	Escala= 1.68	Mínimo= 0.16 Máximo= 7.48 Media= 1.68 Mediana= 1.18
R1.3	Normal	Ubicación= 1.91 Escala= 1.27	Mínimo= 0.05 Máximo= 4.58 Media= 1.91 Mediana= 1.78

Fuente: Elaboración propia (2020).

- 4- Distribución de pasajeros que suben y bajan en cada parada de los recorridos S1 y S2. Las distribuciones que representan a los datos son de dos tipos:
- *Poisson*: En conjuntos de datos que proporcionaron un ajuste favorable, y
  - *Por Tabla*<sup>38</sup>: En conjuntos pequeños de datos o donde el ajuste a una distribución discreta no resultó adecuado.

<sup>38</sup> Para conocer los detalles de la representación "Por tabla" ver APENDICE A: AJUSTE DE DATOS (Utilización de la parada)

Tabla 6-6 Distribución de pasajeros que suben a camiones en las paradas de S1 y S2.

Parada	Función	Parámetros	
P1	Poisson	Media=	2.167
P2	Poisson	Media=	1.877
P3	Poisson	Media=	1.08
P4	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.21
		1	0.71
		2	0.08
P5	Poisson	Media=	1.263
P6	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.23
		1	0.56
		2	0.13
		3	0.08
P7	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.15
		1	0.24
		2	0.15
		[3,4]	0.12
		[5,9]	0.15
		[10,18]	0.19
Q1	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.71
		[1,2]	0.16
		3	0.1
		4	0.03
Q2	Poisson	Media	0.909
Q3	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.42
		1	0.15
		[2,3]	0.34
		[4,8]	0.09
Q4	Poisson	Media=	1.34

Fuente: Elaboración propia (2020).

Tabla 6-7 Distribución de pasajeros que bajan de camiones en las paradas de S1 y S2.

Parada	Función	Parámetros	
P1	NA <sup>39</sup>		
P2	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.82
		1	0.13
		2	0.05
P3	Poisson	Media=	1
P4	Poisson	Media=	0.571
P5	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.404
		1	0.175
		2	0.088
		3	0.211
		4	0.035
		5	0.018
		6	0.035
		[12,13]	0.036
		Total=	0.9998
P6	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.64
		1	0.19
		2	0.06
		3	0.04
		[4,10]	0.07
P7	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.22
		1	0.21
		2	0.15
		3	0.19
		4	0.12
		5	0.04
		[6,8]	0.07
Q1	Poisson	Media=	3.34
Q2	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.72
		[1,4]	0.28
Q3	Poisson	Media=	1.375
Q4	Poisson	Media	0.44

Fuente: Elaboración propia (2020).

<sup>39</sup> P1 no es utilizada para descender de camiones.

**Distribución de pasajeros que suben a vagonetas, en las paradas de S1 y S2**

Parada	Función	Parámetros	
p1	NA <sup>40</sup>		
p2	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.09
		1	0.91
p3	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.10
		1	0.90
p4	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.59
		1	0.29
		2	0.06
		3	0.06
q1	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.75
		1	0.06
		2	0.13
	1.00	3	0.06
q2	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.60
		1	0.36
		2	0.04
q3	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.84
		1	0.16

Tabla 6-8 Distribución de pasajeros que bajan de camiones en las paradas de S1 y S2.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

**Distribución de pasajeros que bajan de vagonetas, en las paradas de S1 y S2**

Parada	Función	Parámetros	
p1	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.571
		1	0.429
p2	Poisson	Media=	2.83
p3	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.30
		1	0.20
		2	0.10
		3	0.20
		4	0.10
		5	0.1
p4	Poisson	Media=	2.118
q1	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.43
		1	0.43
		[2-4]	0.14
q2	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.96
		1	0.04
q3	Tabla	Valor	Probabilidad
		0	0.84
		1	0.16

Tabla 6-9 distribución de pasajeros que bajan de vagonetas en las paradas de S1 y S2.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

**Estructuración de la simulación**

El modelo simula los recorridos durante T horas, modificando la ocupación de las UTP en cada parada a través de los siguientes pasos:

1. Se genera una lista creciente que indica el momento (en escala de minutos) en que las UTP inician el recorrido. El último elemento de la lista no puede sobrepasar  $t=T*60$  min.
2. De acuerdo con los parámetros de entrada, se genera un número aleatorio correspondiente a los asientos de la UTP, así como la capacidad de pasajeros parados. Sumando ambas cantidades se obtiene la capacidad total de la UTP.

<sup>40</sup> p1 no es utilizada para abordar vagonetas.



3. De acuerdo con los parámetros del % de ocupación inicial se genera aleatoriamente el número de pasajeros al inicio del recorrido.
4. De acuerdo con los parámetros de entrada, por cada parada se genera aleatoriamente el número de pasajeros que suben y bajan de la unidad, considerando que si la ocupación actual de la UTP es igual a la capacidad total entonces no es posible que más pasajeros aborden la UTP.
5. En cada parada  $P_i$ , se calcula el porcentaje de ocupación de la UTP, que se considera el porcentaje de carga en la sección entre esa parada y la siguiente.
6. Por cada UTP se recolectan estadísticas de
  - La carga máxima del recorrido (la máxima cantidad de pasajeros que ocuparon la UTP en cualquier sección del recorrido)
  - La sección de máxima carga, por cada UTP.
  - El número de pasajeros que suben y bajan de la UTP en cada parada.

La Figura 6-6 muestra la estructura del programa de simulación sin entrar en los detalles de programación relativos al cálculo específico de cada variable. Previo a esta estructuración se implantaron pequeñas funciones que se utilizaron dentro de esta configuración. El código de este modelo se presenta en el ANEXO D: CODIGO DEL MODELO M1.

Tengamos en mente que los propósitos de este modelo no se relacionaban con la duración de recorridos ni el tiempo destinado en cada parada. Tampoco se tiene interés en conocer el momento preciso en que las UTP se ubican en cada una de las paradas. No obstante, es importante comprender que el parámetro de tiempo, T, tiene como objetivo establecer una condición de paro de la simulación y con ello, definir el número de UTP's que inician recorrido en T horas de donde obtendrás resultados promedio por hora.

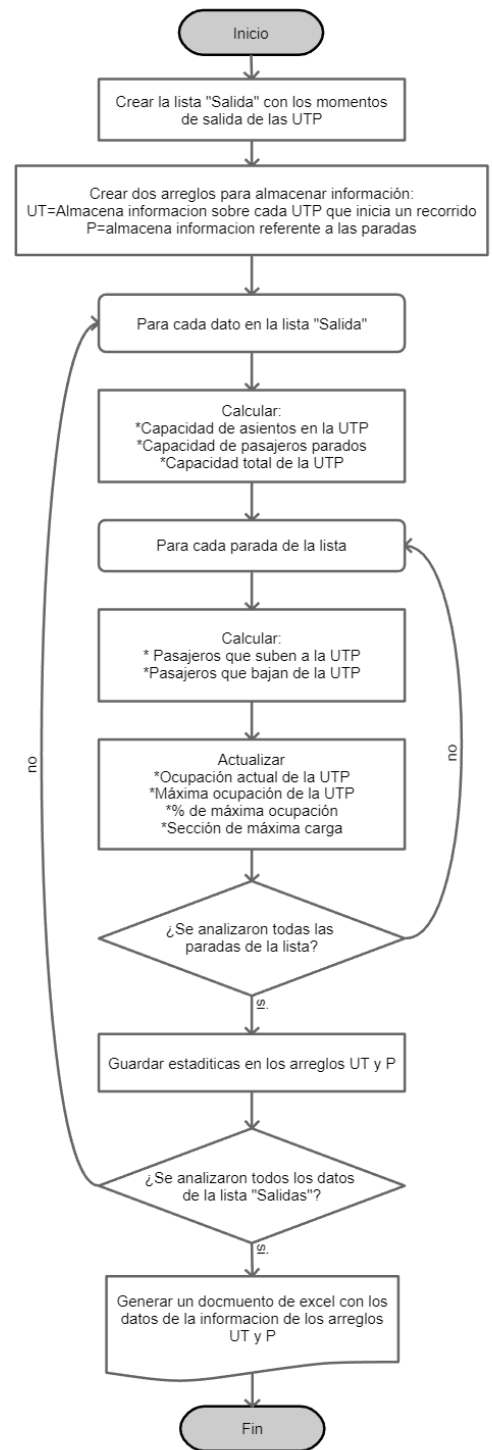


Figura 6-6 Estructura del modelo de simulación M1.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

## Resultados del modelo

Los resultados de la simulación se presentan como dos hojas de Excel, una correspondiente a la información de las UT y otra correspondiente a información de las paradas (Figura 6-7).

Índice	Ruta	Tiempo de Salida	Asientos	Parados	Capacidad Total	Ocupación I	Ocupación I (%)	P1	P1%	P2	P2%	P3	P3%	P4	P4%	P5	P5%	P6	P6%	P7	P7%	Max_ocupación	Segmento de max_ocupación	Categoría Ocupación	
1	1 R40	0.68	33	30	63	23	36.51	25	39.68	26	41.27	25	39.68	25	39.68	24	38.1	26	41.27	22	34.92	26	2	2	
2	2 R40	5.03	33	30	63	29	46.03	31	49.21	36	57.14	35	55.56	35	55.56	35	55.56	35	55.56	44	69.84	44	7	4	
3	3 R40	9.25	33	30	63	28	44.44	29	46.03	30	47.62	29	46.03	29	46.03	26	41.27	27	42.86	25	39.68	30	2	2	
4	4 R40	13.47	33	30	63	11	17.46	12	19.05	13	20.63	12	19.05	13	20.63	15	23.81	15	23.81	23	36.51	23	7	2	
5	5 R40	17.8	32	30	62	22	35.48	22	35.48	24	38.71	24	38.71	22	35.48	24	38.71	22	35.48	24	38.71	27	59.68	27	3
6	6 R40	22.06	31	30	61	25	40.98	26	42.62	27	44.26	28	45.9	28	45.9	26	42.62	28	45.9	44	72.13	44	7	4	
7	7 R40	26.43	32	30	62	27	43.55	28	45.16	30	48.39	31	50	31	50	30	48.39	31	50	46	74.18	46	7	4	
8	8 R40	30.77	31	30	61	23	37.7	26	42.62	28	45.9	28	45.9	29	47.54	30	49.18	30	49.18	44	72.13	44	7	4	
9	9 R40	34.5	31	30	61	20	32.79	24	39.34	28	45.9	28	45.9	28	45.9	29	47.54	30	49.18	43	70.49	43	7	4	
10	10 R40	38.18	30	30	60	29	48.33	30	50	31	51.67	30	50	31	51.67	32	53.33	33	55	34	56.67	34	7	3	
11	11 R40	41.9	31	30	61	10	16.39	13	21.31	15	24.59	15	24.59	15	24.59	16	26.23	16	26.23	12	19.07	16	5	1	
12	12 R40	46.26	32	30	62	12	19.35	13	20.97	13	20.97	14	22.58	15	24.19	9	14.52	9	14.52	10	16.13	15	4	1	
13	13 R40	49.85	33	30	63	26	41.27	29	46.03	30	47.62	28	44.44	29	46.03	27	42.86	28	44.44	30	47.62	30	2	2	
14	14 R40	53.55	33	30	63	11	17.46	13	20.63	14	22.22	12	19.05	13	20.63	15	23.81	15	23.81	14	22.22	15	5	1	
15	15 R40	57.44	33	30	63	15	23.81	18	28.57	20	31.75	20	31.75	20	31.75	15	23.81	15	23.81	16	25.4	20	2	1	

a) Resultados referentes a la ocupación de las UTP's en cada parada.

P1S	P1B	P1T	P2S	P2B	P2T	P3S	P3B	P3T	P4S	P4B	P4T	P5S	P5B	P5T	P6S	P6B	P6T	P7S	P7B	P7T	
1	2	0	2	1	0	1	0	1	1	1	1	2	0	1	1	2	0	2	1	5	6
2	0	2	5	0	1	2	0	1	1	3	3	6	0	0	0	0	0	14	5	19	
3	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	2	0	3	3	1	0	1	1	3	4
4	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	2	0	2	0	0	10	2	12	
5	1	0	0	0	0	2	0	2	1	1	2	1	3	4	2	0	2	15	2	17	
6	1	0	1	2	1	3	1	0	1	1	1	2	0	2	2	3	1	4	16	0	16
7	1	0	1	2	0	2	1	0	1	1	1	2	0	1	1	1	0	1	16	1	17
8	1	0	3	3	1	4	1	1	1	2	2	1	0	1	1	1	2	15	1	16	
9	4	0	4	4	0	4	0	0	0	0	0	2	1	3	1	0	1	15	2	17	
10	1	0	1	1	0	1	1	2	3	1	0	1	1	0	1	1	0	1	4	3	7
11	3	0	3	2	0	2	0	0	0	1	1	2	1	3	1	1	2	1	5	6	
12	1	0	1	2	2	4	1	0	1	1	0	1	0	6	6	0	0	2	1	3	
13	3	0	3	1	0	1	0	2	2	1	0	1	1	3	4	1	0	1	2	0	2
14	2	0	2	1	0	1	0	2	2	1	0	1	2	0	2	1	1	2	0	1	1
15	3	0	3	2	0	2	1	1	2	1	1	2	1	6	7	1	1	2	2	1	3

a) Resultados referentes a las paradas que realiza cada UTP

Figura 6-7 Ejemplo de los resultados obtenidos en una réplica del modelo de simulación M1. Fuente: Elaboración propia (2020).

## Validación y verificación del modelo

La verificación del modelo se realizó como un proceso continuo al determinar que no existían errores de codificación en la plataforma de Python. Cada vez que se presentó un error de compilación el código fue analizado y corregido las veces necesarias hasta eliminar todos los errores.

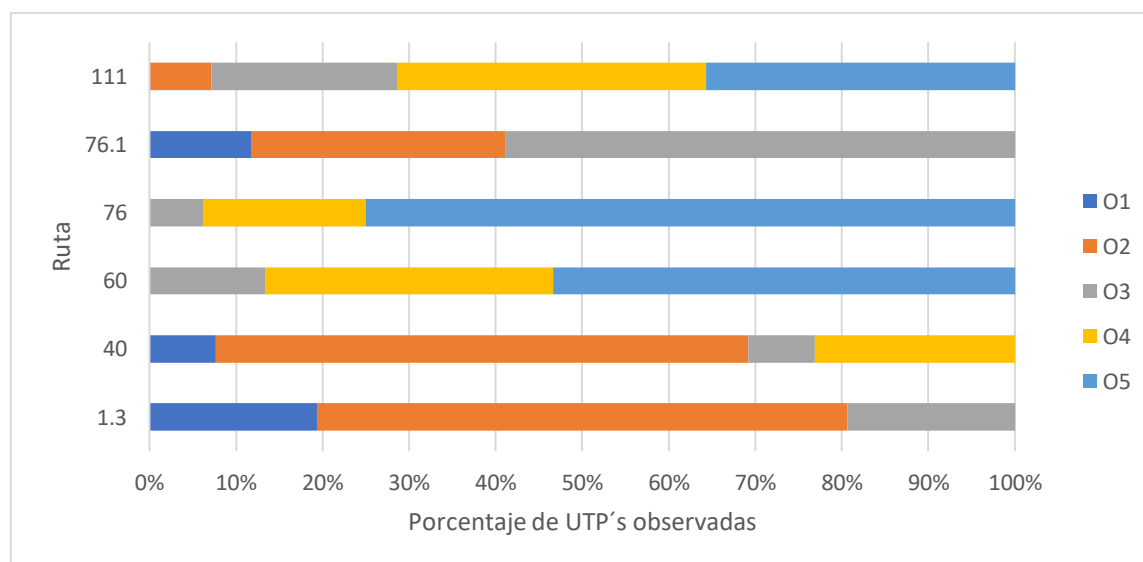
Como parte de la validación de este modelo, se categorizó la ocupación de las UTP's de cada ruta, de acuerdo con la Tabla 6-10.

Tabla 6-10 Clasificación de ocupación de las Unidades de Transporte Público<sup>41</sup>.

Clasificación de ocupación para Camiones		
O1	Vacío	Entre 0 y la capacidad media de pasajeros sentados
O2	Medio	Entre la capacidad media y máxima de pasajeros sentados
O3	Medio lleno	Entre la capacidad máxima de pasajeros sentados y el 30% de la capacidad de pasajeros parados.
O4	Lleno	Entre el 30% el 70% de pasajeros parados más el 100% de su capacidad de pasajeros sentados.
O5	Muy lleno (completo)	Entre el 70% y 100% de pasajeros parados más el 100% de su capacidad de pasajeros sentados.
Clasificación de ocupación para Vagonetas		
O1	Vacío	Entre 0 a 5
O2	Medio	De 6 a 12
O3	Medio lleno	más de 12

Fuente: Elaboración propia (2020).

De la Gráfica 6-1 podemos observar que la categoría de ocupación del sistema real varía entre rutas. Por ejemplo, en las rutas R40 y R1.3 la categoría más observada es O2, es decir, comúnmente en la última parada del recorrido S1 se pueden observar UTP's con más de la mitad de los asientos ocupados y sin pasajeros parados. Por otro lado, las rutas R60, R76 y R76.1 llegan a la última parada del recorrido S1 "muy llenas". Esta variación en la categoría de ocupación se debe a que las rutas tienen diferentes destinos y debido a ello la validación del modelo se realizó a través de la validación de los resultados de cada una de las rutas en cuestión.



Gráfica 6-1 Categorías de ocupación observadas en la UTP's al final del recorrido S1, por ruta.

Fuente: Elaboración propia (2020).

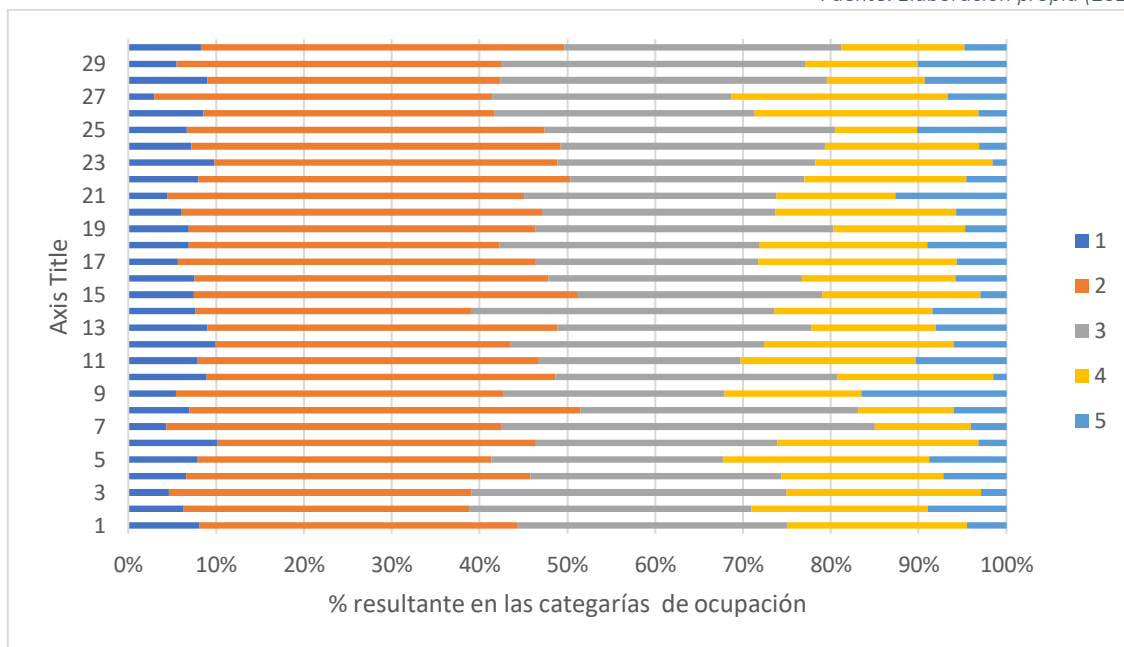
<sup>41</sup> Esta categorización fue definida en la etapa de recolección de datos, como a poyo a la *estimación* de pasajeros a bordo de una UT. Se acudió a este método puesto que el tiempo de parada de las UT no es suficiente para realizar conteos ni observaciones precisas que proporcionen información exacta.

Los resultados de validación corresponden a 30 réplicas del modelo, con parámetro T=10 y fueron obtenidos en hojas de cálculo como lo muestra la Figura 6-8. Dichos resultados fueron analizados por medio de graficas que permite visualizar las categorías de mayor frecuencia en cada réplica.

La Gráfica 6-2 muestra como ejemplo los resultados de validación de la ruta R40. Las dos categorías más frecuentes observadas en el sistema real son O2 y O3 respectivamente (Gráfica 6-1), lo cual concuerda con la información de la Gráfica 6-2. Es interesante observar que la categoría O5 no se observó ninguna vez en el periodo de recolección de datos y sin embargo en los resultados del modelo dicha categoría está presente (Gráfica 6-2). Esta situación es aceptable dado que el porcentaje de aparición de esta categoría es relativamente pequeño y nulo en algunas réplicas.

	A	B	C
1	Réplica	Ruta	Categoría de ocupación
143	1	R40	2
144	1	R40	2
145	1	R40	1
146	1	R40	2
147	1	R40	2
148	1	R40	2
149	2	R40	2
150	2	R40	2
151	2	R40	3
152	2	R40	1
153	2	R40	2
154	2	R40	2
155	2	R40	2
156	2	R40	2
157	2	R40	2
158	2	R40	2
159	2	R40	2
160	2	R40	3
161	2	R40	2
162	2	R40	2
163	2	R40	1
164	2	R40	3
165	2	R40	3
166	2	R40	2
167	2	R40	2
168	2	R40	3
169	2	R40	2

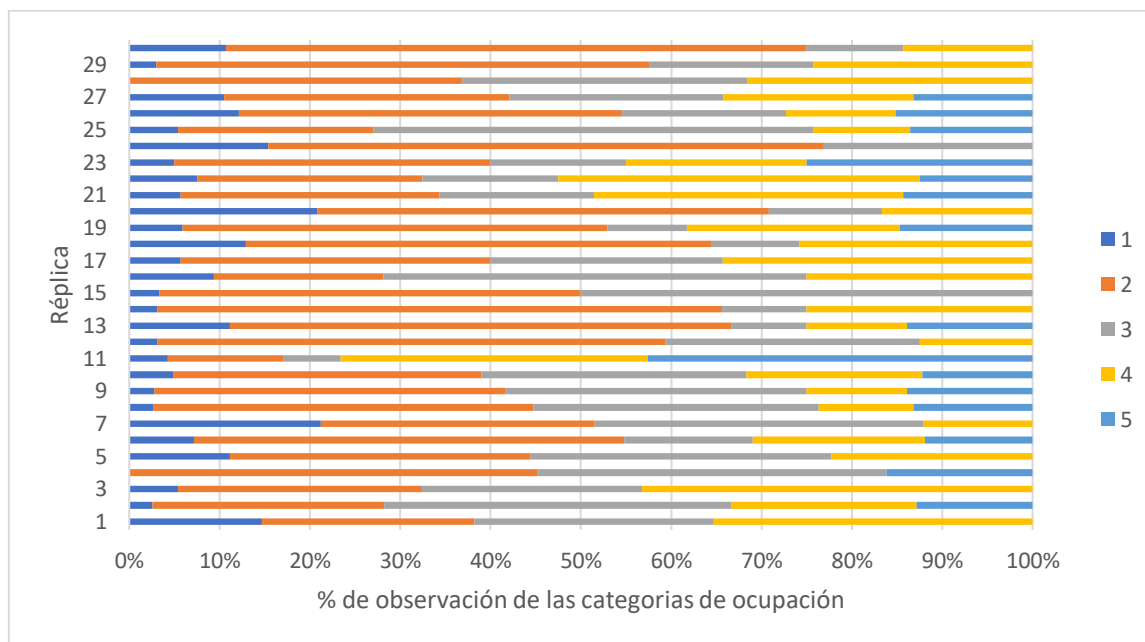
Figura 6-8 Ejemplo de los resultados obtenidos para la validación del modelo.  
Fuente: Elaboración propia (2020).



Gráfica 6-2 Resultados de validación del modelo M1 para la ruta R40  
Réplicas= 30, T=10 horas.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Es preciso mostrar que al elegir T=10 horas se observa un comportamiento similar en todas las réplicas de Gráfica 6-2, ya que menor tiempo de simulación, por ejemplo, T=1 hora, proporciona resultados inestables de los cuales es difícil obtener conclusiones. Ejemplo de esto se ilustra en la Gráfica 6-3 donde aproximadamente en la mitad de los resultados aparece la categoría O5.

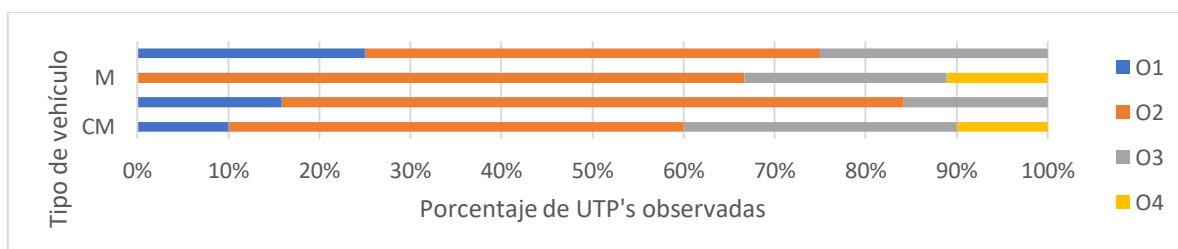
Dos casos particulares se presentan en las réplicas 11 y 29 de la Gráfica 6-3. En la réplica 11, O5 aparece con alto porcentaje (más que el 30%), mientras que en la réplica 29, O5 no aparece, reflejando similitud con la situación real.



Gráfica 6-3 Resultados de validación del modelo M1 para la ruta R40. Réplicas= 30, T=1 hora.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Este método de validación busca obtener resultados que representen el comportamiento de la ruta y, aun cuando los valores porcentuales no coincidan estrictamente, se considera un método de validación adecuado, ya que la información real observada puede ser considerada como el resultado de una réplica del modelo que está sujeta a aleatoriedad. Por otro lado, con la experiencia obtenida en la etapa de recolección de datos es posible afirmar que los resultados obtenidos son apropiados y representan de manera oportuna el sistema real.

De manera análoga se validaron los resultados correspondientes a al recorrido S2. No obstante, en este caso se consideró la validación conjunta de las rutas de acuerdo con el tipo de vehículo con el que operan: Por ejemplo, las rutas R40, R60 y R76 que operan con camiones verdes (CV) se validaron en conjunto por medio de la etiqueta "RCV".



Gráfica 6-4 Categorías de ocupación observadas en la UTP's al final del recorrido S2, por tipo de vehículo.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Cabe mencionar que la validación conjunta se consideró porque el número de recorridos correspondiente a cada ruta fueron pocos, por lo que no fue posible estimar las categorías de ocupación por ruta. Además, S2 es la intersección de la parte final de los recorridos completos de las diferentes rutas. Por esta razón se supone que la mayoría de los pasajeros que realizan el recorrido S2, lo hacen indistintamente ya el destino es el mismo. Esta circunstancia no ocurre en S1 pues de manera contraria, se trata del inicio de los recorridos completos de cada ruta y el destino es diferente.

Una observación interesante es que al final de S1 la ocupación de las UTP's es generalmente mayor que al final del recorrido S2.

## Análisis y discusión de resultados

Al simular la operación de cada una de las rutas, se obtiene un conjunto de resultados, como los que se muestran en la Figura 6-7. Para cada uno de ellos es posible calcular un conjunto de estadísticas descriptivas básicas como el valor mínimo, el valor máximo, la media, mediana, etc. Sin embargo, teniendo presente el propósito de esta simulación, nos limitaremos a estudiar las siguientes variables de salida:

- 1- El promedio de la suma de máxima carga de las UTP's, por hora, considerando recorridos en camión y vagoneta.
- 2- El segmento de máxima carga para recorridos en camión.
- 3- El segmento de máxima carga para recorridos en vagoneta.
- 4- La cantidad promedio de camiones operando por hora.
- 5- La cantidad promedio de vagonetas operando por hora.

The screenshot shows the output of a Python simulation in an IDE. The main window displays the results for two routes, S1 and S2. Each route's results are presented in two parts: a table for 'El arreglo de UT es:' (UT arrangement) and a table for 'El arreglo de UT es:' (UT arrangement). The tables include columns for 'Índice Ruta', 'Ruta', 'Tiempo de Salida', 'Asientos', 'Parados', 'Capacidad Total', 'Ocupación i', and 'Ocupación i (%)'. The 'Ocupación i (%)' column is further detailed with sub-columns P1 through P6, representing different occupancy categories. The results for S1 and S2 are shown sequentially, with S1 results appearing first and S2 results appearing second.

Figura 6-9 Resultados independientes del modelo M1, por ruta.

Fuente: Elaboración propia (2020).

A partir de la suma de la máxima carga de cada UTP's se pretende estimar la demanda de pasajeros en T horas. Y posteriormente el promedio por hora. La elección de la máxima carga y no de la carga promedio por UTP's surge teniendo en mente satisfacer la demanda en todo momento y evitar que los pasajeros no sean transportados por falta de espacio.

Para analizar los resultados del modelo respecto a estas variables se definieron dos fases:

### FASE I

- 1- Generar resultados independientes por cada ruta (ver Figura 6-9).
- 2- Agrupar los resultados de todas las rutas considerando únicamente las variables: “Máxima\_Carga” y “Sección\_Máxima\_Carga”, (Figura 6-10).
- 3- Sumar la variable “Máxima\_Carga” de cada UTP y obtener el promedio por hora (considerando todas las rutas). A partir de este momento el valor promedio por hora será denotado por el mismo nombre “Máxima\_Carga”
- 4- Considerando las categorías<sup>42</sup>: “Camiones” para R40, r60, R76, R1.3 y R111 y “Vagonetas” para R76.1, hacer lo siguiente
  - Identificar la sección de máxima carga (**Sección\_Máxima\_Carga**) en cada categoría.
  - Calcular el número promedio de camiones que operan por hora, en cada categoría.

```

Run: Pasajeros_S1 x
644 5 6 R76_1 14.26 18 5 23 18
645 6 7 R76_1 15.79 20 5 25 21
646
647 Los resultados conjuntos son:
648 Ruta Máxima_Carga Sección_Máxima_Carga
649 0 R40 32 6
650 1 R40 19 2
651 2 R40 36 6
652 3 R60 47 7
653 4 R60 59 7
654 5 R60 46 2
655 6 R111 35 2
656 7 R1_3 19 7
657 8 R1_3 42 7
658 9 R1_3 27 7
659 10 R1_3 19 2
660 11 R1_3 12 6
661 12 R76 56 5
662 13 R76 56 6
663 14 R76 46 1
664 15 R76 63 2
665 16 R76 46 0
666 17 R76 61 1
667 18 R76_1 19 0
668 19 R76_1 22 0
669 20 R76_1 19 0
670 21 R76_1 22 0
671 22 R76_1 22 0
672 23 R76_1 18 0
673 24 R76_1 21 0
674
675 Resultados de la Réplica: 1
676 Promedio de Máxima Carga por hora 2880.0
Sección de máxima carga en Camiones: [2, 7]
Sección de máxima carga en Vagonetas: [0]
Cantidad promedio de camiones por hora: 23.333
Cantidad promedio de vagonetas por hora: 60.0
Process finished with exit code 0
    
```

Figura 6-10 Ejemplo de los resultados obtenidos en la Fase 1 del análisis de resultados del modelo M1.

Fuente: Elaboración propia (2020).

<sup>42</sup> Se hace la diferenciación entre el recorrido de la ruta 76.1 y las demás rutas ya que, realizan paradas en distintos puntos.

Los resultados de la Fase I se obtienen directamente de los resultados independientes por ruta, donde se consideró T=20. Un ejemplo ilustrativo (con T=0.3) se presenta en la Figura 6-10, donde el número de UTP's es diferente para cada ruta. Esto se debe a que el intervalo de salida es una variable aleatoria con comportamiento diferente para cada ruta.

Hasta el momento los resultados obtenidos corresponden a una única réplica de simulación en la que se han considerado todas las rutas de interés. Para poder obtener conclusiones y apegándonos a la metodología de simulación se planteó la Fase 2 de la siguiente manera:

## FASE 2

- 1- Extraer los resultados de 500 réplicas (como en la Fase I).
- 2- Generar gráficas de las variables de interés bajo las siguientes consideraciones:
  - Para las variables *Máxima Carga*, *Camiones operando por hora* y *Vagonetas operando por hora* considerar los valores promedio de los resultados obtenidos en la Fase I. El primer dato graficado corresponde al resultado de la réplica 1, el segundo dato graficado corresponde al promedio de los resultados obtenidos en la réplica 1 y 2. Este procedimiento se repite y el último dato de la gráfica corresponde al promedio de los resultados obtenidos en las 500 réplicas.
  - Para identificar la sección de máxima carga en los recorridos de camiones y vagonetas, en cada réplica se obtuvieron las secciones de máxima carga, consideradas como el valor modal de la variable "**Sección\_Máxima\_Carga**", en donde es posible obtener más de un valor. Los valores resultantes fueron almacenados en una lista de la cual, nuevamente se toma como dato representativo el valor modal<sup>43</sup>.

Como ejemplo considere la información de la Tabla 6-11, donde, al final del de la réplica 5 el valor representativo de la sección de máxima carga es 7.

**Tabla 6-11 Datos representativos de la variable "Sección\_Máxima\_Carga" en 5 réplicas.**

Réplica	Valor de la variable "Sección_Máxima_Carga"	Lista de valores obtenidos	Valor representativo (valor modal de la lista)
1	5	(5)	5
2	5,7	(5,7,5)	5
3	7	(5,7,5,7)	(elección aleatoria)
4	6,7	(5,7,5,7,6,7)	7
5	7	(5,7,5,7,6,7,7)	7

Fuente: Elaboración propia (2020).

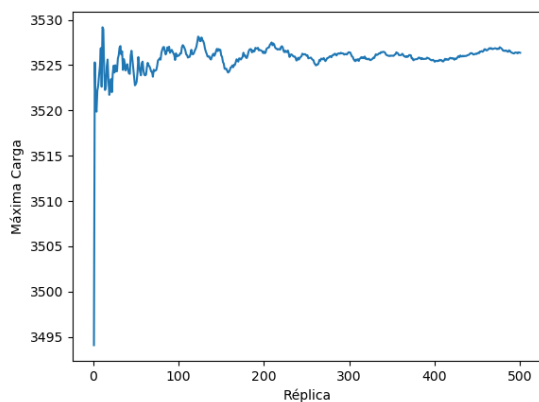
- 3- Definir el valor representativo de cada variable, considerando el último valor de la gráfica. Debido a que tanto pasajeros como vehículos son variables de carácter discreto, se considera como valor representativo el entero superior más próximo.

<sup>43</sup> Si existen dos valores modales en la lista, el valor representativo se elige aleatoriamente entre los distintos valores modales.

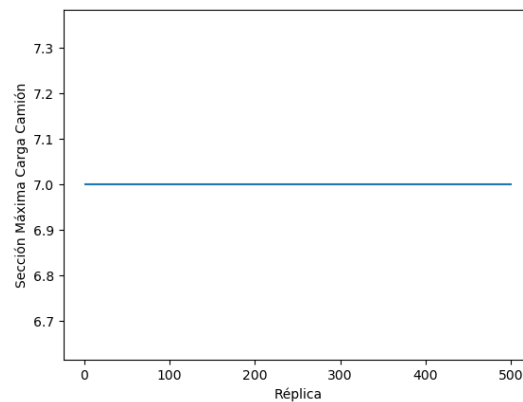


La Gráfica 6-5 muestra el comportamiento de la variable de **Máxima\_Carga** en el sentido S1. Notemos que, al considerar pocas réplicas, el valor promedio de **Máxima Carga** presenta grandes oscilaciones entre 3494 y 3530. A medida que el número de réplicas incrementa, el valor promedio se estabiliza, las oscilaciones disminuyen y se observa convergencia hacia el valor 3526, el cual será tomado como el valor representativo de esta variable, ya que el último valor graficado es 3525.82.

En el caso de la *Sección de máxima carga para camiones*, la Gráfica 6-6 es simplemente una línea recta horizontal que indica que la sección de máxima carga es a partir de P7 en todas las réplicas.

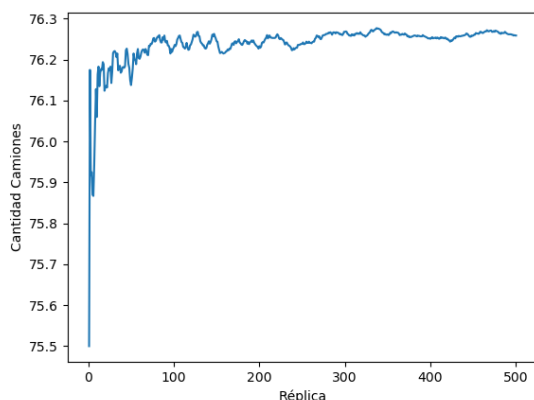


Gráfica 6-5 Comportamiento de la variable "Máxima Carga", en recorrido S1.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

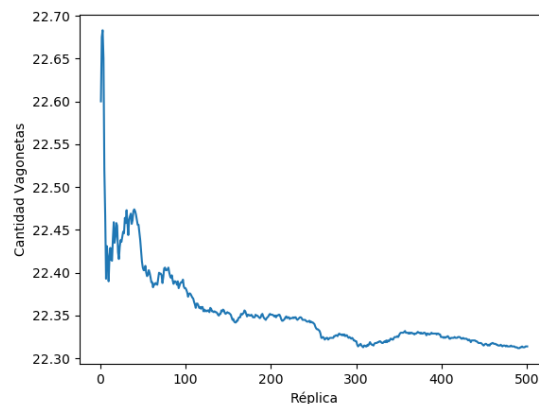


Gráfica 6-6 Comportamiento de la variable "Sección Máxima Carga Camión", en recorrido S1  
Fuente: Elaboración propia (2020)

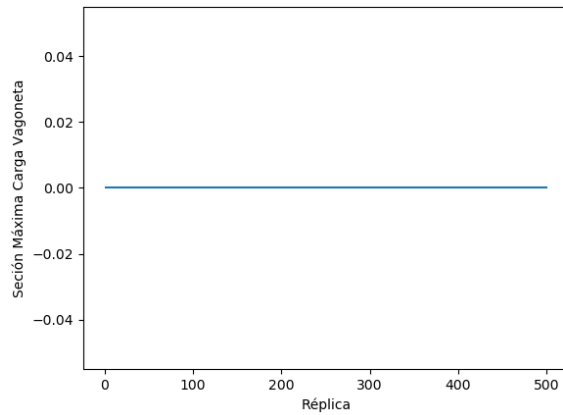
Análogamente se analizan el resto de las variables de interés correspondientes a camiones y vagonetas, tanto en el sentido S1 como en S2. El conjunto de gráficas resultantes se presenta a continuación.



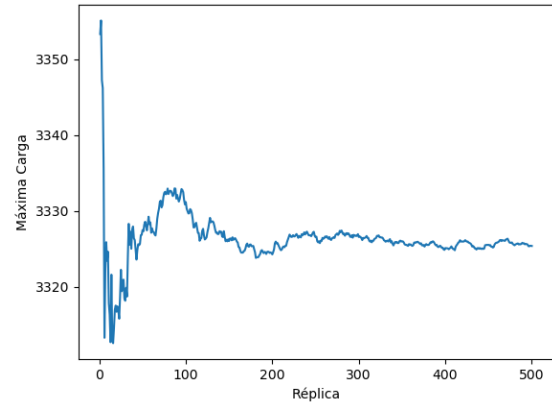
Gráfica 6-7 Comportamiento de la variable "Cantidad de Camiones", en recorrido S1.  
Fuente: Elaboración propia (2020).



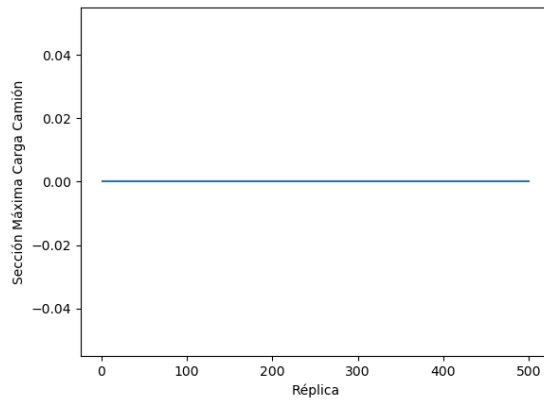
Gráfica 6-8 Comportamiento de la variable "Cantidad de Vagonetas", en recorrido S1.  
Fuente: Elaboración propia (2020).



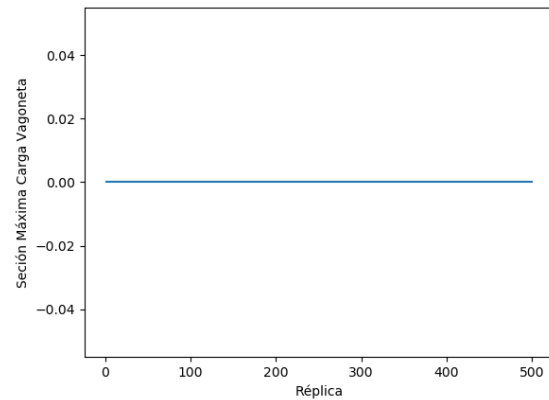
Gráfica 6-9 Comportamiento de la variable "Sección de Máxima Carga Vagonetas", en recorrido S1. Fuente: Elaboración propia (2020).



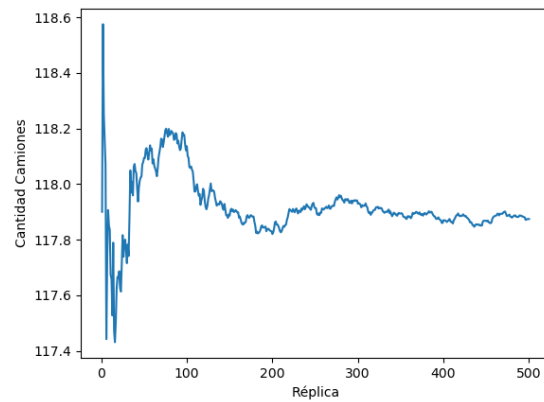
Gráfica 6-10 Comportamiento de la variable "Máxima Carga", en recorrido S2. Fuente: Elaboración propia (2020).



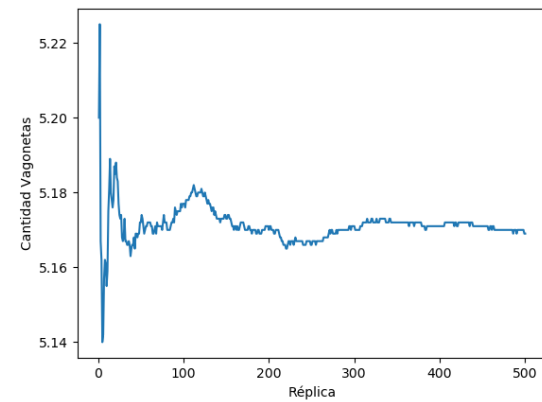
Gráfica 6-11 Comportamiento de la variable "Sección de Máxima Carga Camión", en recorrido S2. Fuente: Elaboración propia (2020).



Gráfica 6-12 Comportamiento de la variable "Sección de Máxima Carga Vagonetas", en recorrido S2. Fuente: Elaboración propia (2020).



Gráfica 6-13 Comportamiento de la variable "Cantidad de Camiones", en recorrido S2. Fuente: Elaboración propia (2020).



Gráfica 6-14 Comportamiento de la variable "Cantidad de Vagonetas", en recorrido S2. Fuente: Elaboración propia (2020).

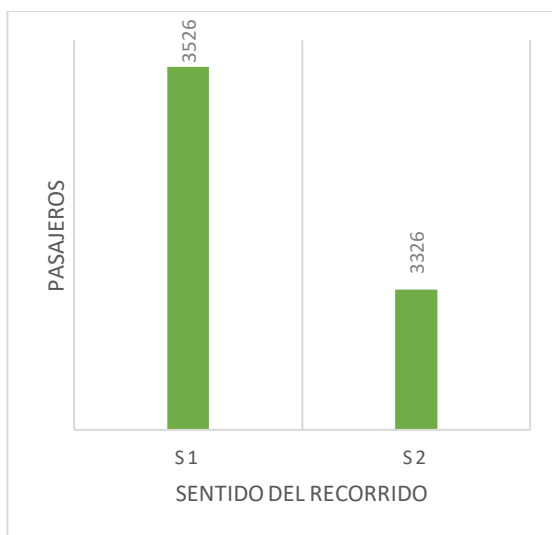
En resumen, la Tabla 6-12 presentan los resultados finales obtenidos a partir de las gráficas anteriores. Se concluye que, en los recorridos de camiones, en el sentido S1, la sección de máxima carga comienza a partir de la P7, es decir, al finalizar el recorrido de interés para este trabajo. Por otro lado, en S2, la sección de máxima carga es entre Q1 y Q2. En cuanto a los recorridos de vagonetas, la sección de máxima carga es al inicio de cada recorrido, es decir, en la sección p1-p2 para S1 y en q1-q2 para S2.

**Tabla 6-12 Tabla comparativa de resultados del modelo M1**

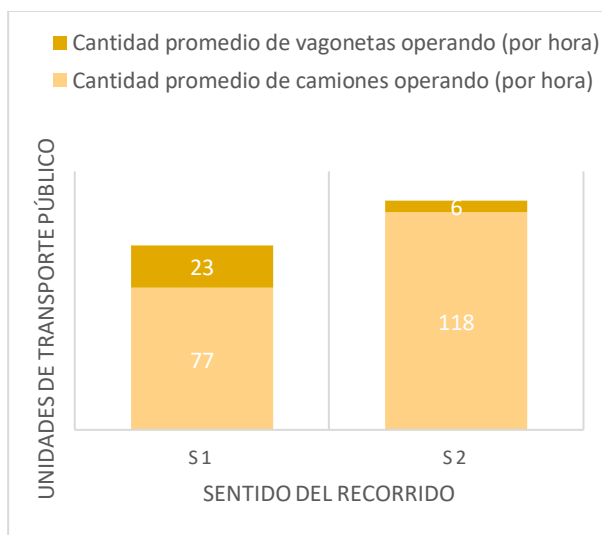
Variable	S1			S2		
	Mínimo	Máximo	Valor representativo	Mínimo	Máximo	Valor representativo
Máxima Carga (promedio por hora)	3494.1	3529.177	3526	3312.619	3355.075	3326
Sección de máxima carga en camiones	7	7	7	0	0	0
Sección de máxima carga en Vagonetas	0	0	0	0	0	0
Cantidad promedio de camiones operando (por hora)	75.5	76.277	77	117.431	118.575	118
Cantidad promedio de vagonetas operando (por hora)	22.312	22.683	23	5.14	5.225	6

Fuente: Elaboración propia (2020).

La Gráfica 6-15 nos permite observar fácilmente que el número de pasajeros promedio por hora que viajan en el sentido S1 es mayor que en S2, con una diferencia de 200 pasajeros (por hora). Mientras tanto, de la Gráfica 6-16 es posible apreciar la diferencia de UTP operando en cada sentido del recorrido. De acuerdo con estos resultados, es preciso considerar que, si la cantidad de pasajeros que requieren movilizarse en S1 es mayor que en S2, entonces deberían de operar más UTP's en S1 que en S2, lo cual no sucede, es decir, la cantidad de usuarios que realizan los recorridos R4 y R5 no es proporcional a la cantidad de UTP que operan en dichos recorridos.



Gráfica 6-15 Máxima Carga en S1 y S2 (Promedio por hora)  
Fuente: Elaboración propia (2020).



Gráfica 6-16 Cantidad promedio de UTP's operando por hora.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

## 6.2 Modelo M2

### Descripción general

El modelo M2 tiene como objetivo principal estimar el tiempo de recorrido en unidades de Metrobús, lo que puede ser simulado como la suma de variables aleatorias. Se trata de una simulación Monte Carlo, con una estructura más simple que la de M1, por lo que fue implementada en hojas de Excel. La condición de paro es bien definida por el usuario, como un parámetro de entrada. El modelo genera variables aleatorias que representan la velocidad de recorrido de la UMB entre las estaciones. A partir de cada valor generado se obtiene el tiempo de viaje en cada sección, teniendo como resultado final la duración total de cada recorrido. Se recomienda revisar previamente las secciones 4.4 (pág. 90) y 5.1 (pág. 95) donde se describe la operación actual de la línea 1 del Metrobús y la propuesta de extensión para esta línea, respectivamente.

### Propósito

Estimar la duración de recorridos sobre UMB's en la extensión propuesta para la línea 1 del Metrobús.

### Modelo conceptual

El modelo conceptual corresponde a los recorridos en dirección d1 y d2 de la propuesta para la extensión de la línea 1 del Metrobús, considerando estaciones y cruceros con semáforos, como se ilustra en la Figura 6-11. Aunque este modelo conceptual no representa adecuadamente la distancia entre cada par de estaciones, la ubicación de los semáforos simboliza adecuadamente que la mayoría de ellos se encuentran muy cerca de las nuevas estaciones que se proponen, a una distancia menor que 300 m. Un caso excepcional es C5 en d2, cuya distancia a E1 y CCU es aproximadamente de 800 m y 1.1 km, respectivamente.

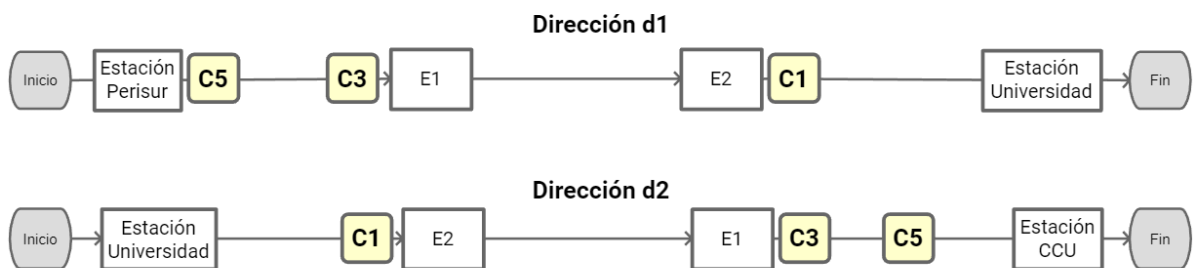


Figura 6-11 Recorrido de UMB's en dirección d1 y d2.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Para simplificar este modelo, se consideraron únicamente las secciones entre estaciones, a excepción de C5 en d2. El modelo conceptual resultante a esta simplificación se presenta en la Figura 6-12, donde además se indica el nombre (denotado por T) y la distancia en cada sección de los recorridos.

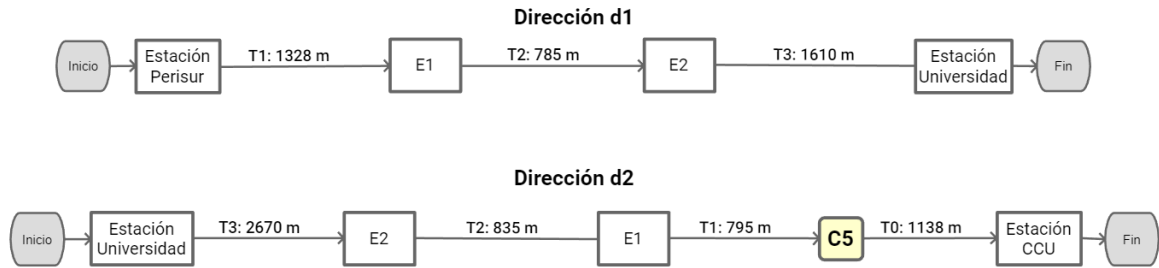


Figura 6-12 Modelo conceptual de M2.  
Fuente: Elaboración propia.

### Supuestos y consideraciones

- El tiempo total de un recorrido se define como

$$T = T_r + T_p + T_c \quad (3)$$

donde

$T_r$ : Tiempo de recorrido entre dos estaciones consecutivas (o entre estación y cruceo semafórico)

$T_p$ : Tiempo en paradas

$T_c$ : Tiempo de espera en cruceos con semáforos

- El tiempo de recorrido entre dos estaciones se calcula a partir de la velocidad media de las UMB. Dicha velocidad se obtiene a partir de las distribuciones de probabilidad que caracterizan la velocidad de operaciones en las secciones S1, S2 y S3<sup>44</sup> de la línea 1 del Metrobús.
- La asignación de las funciones de distribución de probabilidad en cada sección  $T_i$  (Figura 6-12) fue definida considerando analogías en distancia con las secciones  $S_j$  (de la actual línea del Metrobús, ver Figura 4-47, pág. 90). En las secciones  $T_i$ , no se tomó directamente la distancia total, sino que se consideró la mayor distancia entre cruceos y estaciones, suponiendo que en tal segmento de la sección es posible alcanzar velocidades similares a las de la operación actual de la línea, ya que, de esta manera se asegura que no existen señales semafóricas que impliquen reducir la velocidad al hacer parada.
- La sección de menor distancia entre cruceos y estaciones no se considera para definir la velocidad de operación, pero sí para estimar el tiempo de recorrido total en cada sección T.

<sup>44</sup> Ver sección 4.4: Operación de la línea 1 del Metrobús

Por ejemplo, en d1, el cruce C1 se encuentra aproximadamente a 70 metros de E2 y a 1.5 km de la estación Universidad (ver Figura 6-13), entonces, se consideró una velocidad de operación similar a S1, cuya longitud es de aproximadamente 1.2 km. En este caso, 1.5 km es mayor que 1.2 km, y las UMB pueden alcanzar mayores velocidades, sin embargo, la velocidad en los primeros 70 metros será muy baja ya que es una distancia corta donde la UMB cuenta con el tiempo y espacio suficiente para acelerar y alcanzar altas velocidades. La velocidad considerada en cada sección T se presenta en la en la Tabla 6-13.

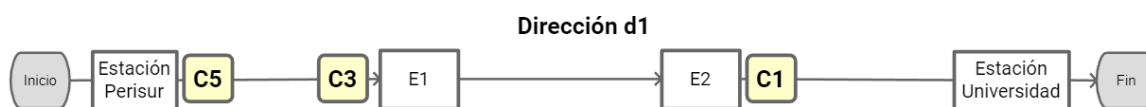


Figura 6-13 Cruceos y estaciones en el recorrido d1 de Metrobús.

Fuente: Elaboración propia (2020).

Tabla 6-13 Analogías por distancia entre las secciones S y T.

Sección	Estación origen y destino	Cruceos en la sección	Longitud de la sección	Distancia más corta al cruceo (m)	Distancia más grande al cruceo (m)	Analogía por distancia
Dirección d1: Distancia total 3.723 km						
T1	P-E1	C5, C3	1328	290	1038	S1
T2	E1-E2		785		785	S1
T3	E2-CU	C1	1610	70	1540	S2
Dirección d2: Distancia total 5.438 km						
T3	CU-E2	C1	2670	170	2500	S2
T2	E2-E1		835		835	S1
T1	E1-C5	C3	795	125	670	S3
T0	C5-CCU		1138		1138	S2

Fuente: Elaboración propia (2020).

- El tiempo en parada en cada estación se calcula a partir de una distribución beta, cuyos parámetros se obtienen a partir de los valores promedio observados en las 5 estaciones consideradas para la toma de datos. La diferencia entre el valor mínimo y máximo promedio es tan solo 5 segundos, aproximadamente.
- Únicamente se consideran los tiempos de parada en las estaciones E1 y E2, ya que las estaciones Perisur, Universidad y CCU son consideradas puntos de inicio y fin de los recorridos y no estaciones intermedias.
- Los tres cruceos, C1, C2 y C3, son considerados en ambas direcciones, d1 y d2. El tiempo de espera en los cruceos se obtiene a partir de la duración de ciclos semafóricos y de la duración de la fase en la que las UMB tienen permitido transitar. Por ejemplo, en C3, el ciclo semafórico tiene duración total de 150s y la fase 2, en la que las UMB pueden transitar, tiene duración de 90s, por lo tanto, con probabilidad de  $0.6=90s/150s$ , el tiempo de espera en C5 será de 0 segundos y con probabilidad

0.4, el tiempo de espera podrá tomar un valor entre 1 y 60 segundos (el tiempo que complementa la duración total del ciclo semafórico)

- **Parámetros de entrada**

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, los parámetros de entrada para este modelo se presentan en la Tabla 6-14. También se considera la distancia de cada sección de acuerdo con la Tabla 6-13.

**Tabla 6-14 Parámetros de entrada del modelo M2.**

Parámetros de velocidad					
Sección	Distribución de probabilidad	P. Ubicación/Forma		P. Escala	
S1	Normal	11.010		1.1823	
S2	Lognormal	2.484		0.0853	
S3	Weibull	9.8974		10.4064	
Parámetros de ciclos semafóricos					
Crucero	Tiempo total del ciclo semafórico (s)	Tiempo luz verde (s)	Máximo tiempo de espera (s)	% luz verde	% esperar
C1	130	30	100	0.23	0.77
C3	150	90	60	0.60	0.40
C5	100	25	75	0.25	0.75
Parámetros de tiempo en parada					
Distribución Beta		Alfa:	4.0878	Mínimo:	8.13
		Beta:	3.9075	Máximo:	13.45

Fuente: Elaboración propia (2020).

### Estructuración de la simulación

Debido a la sencillez de este modelo, la variable de interés (duración de recorridos) es obtenida directamente al sumar  $T_r$ ,  $T_p$  y  $T_c$ . Por lo tanto, la estructuración del modelo consiste básicamente en generar valores aleatorios acordes con los parámetros de entrada.

Una réplica  $r$  del modelo consiste en calcular la duración del recorrido  $d$  veces. El modelo permite elegir la cantidad de réplicas y datos por réplicas, siempre que  $r \times d \leq 10000$ . A diferencia del modelo M1, este modelo permite la interacción con el usuario ya que la cantidad de parámetros de entrada es menor y pueden ser modificados fácilmente. La estructura del modelo se ilustra en la Figura 6-11, donde se ha establecido  $r=3$  y  $d=7$ .

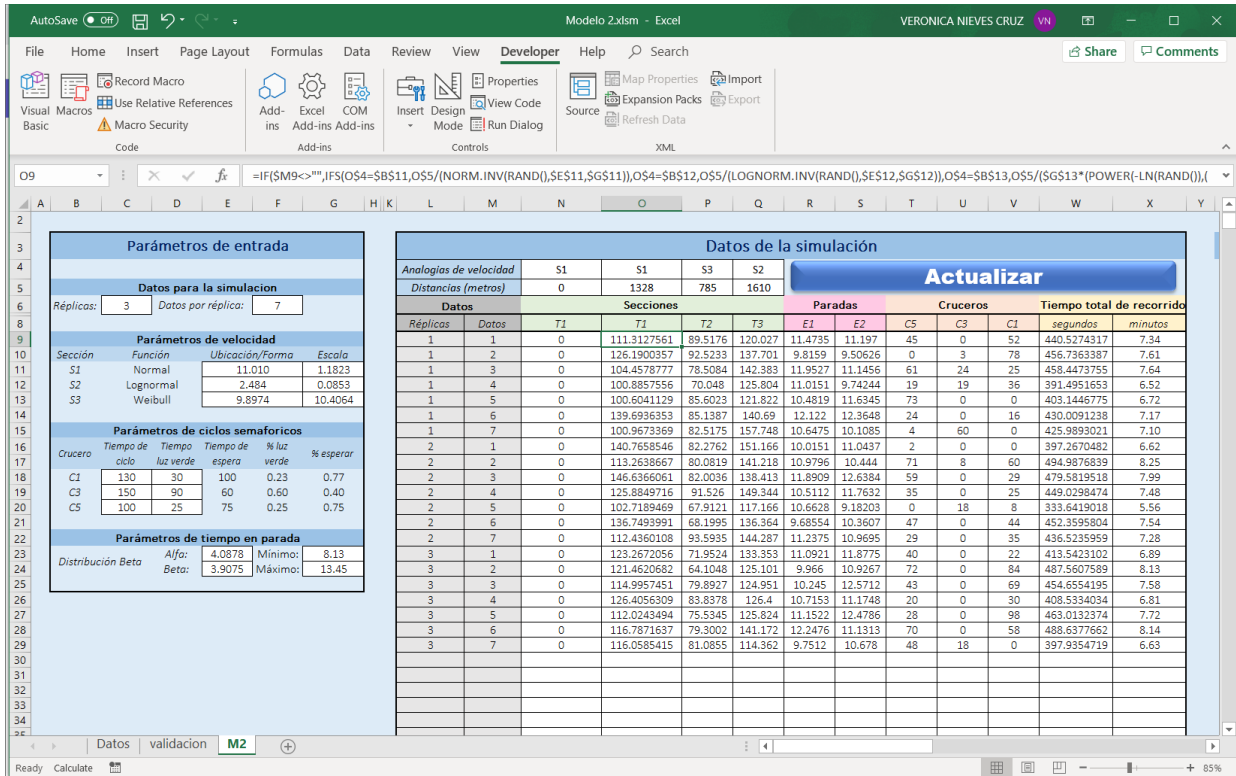


Figura 6-14 Estructura del modelo M2.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

## Validación y verificación del modelo

La validación del modelo consistió en corroborar que cada uno de los valores generados para las variables  $T_r$ ,  $T_p$  y  $T_c$  fuera adecuado y dentro de un rango razonable. Por otro lado, el modelo fue clasificado como verificado al no presentar errores de sintaxis.

## Análisis y discusión de los resultados

Los valores del modelo fueron generados en escala de segundos, sin embargo, para el resultado final se consideró la escala en minutos. Esto, con el objetivo de tener una clara noción del resultado final y posteriormente hacer comparaciones con los resultados de los recorridos realizados actualmente por camiones.

El modelo permite visualizar una gráfica que ilustra los valores mínimo, promedio y máximo del tiempo de recorrido en cada réplica, así como un histograma de los  $r \times d$  datos obtenidos, el cual nos permite observar la distribución de los valores y su comportamiento. Además, los resultados incluyen los intervalos de confianza (del 95% de confianza) para la media tanto global como por réplica. Un ejemplo ilustrativo de los resultados del modelo es la Figura 6-15.



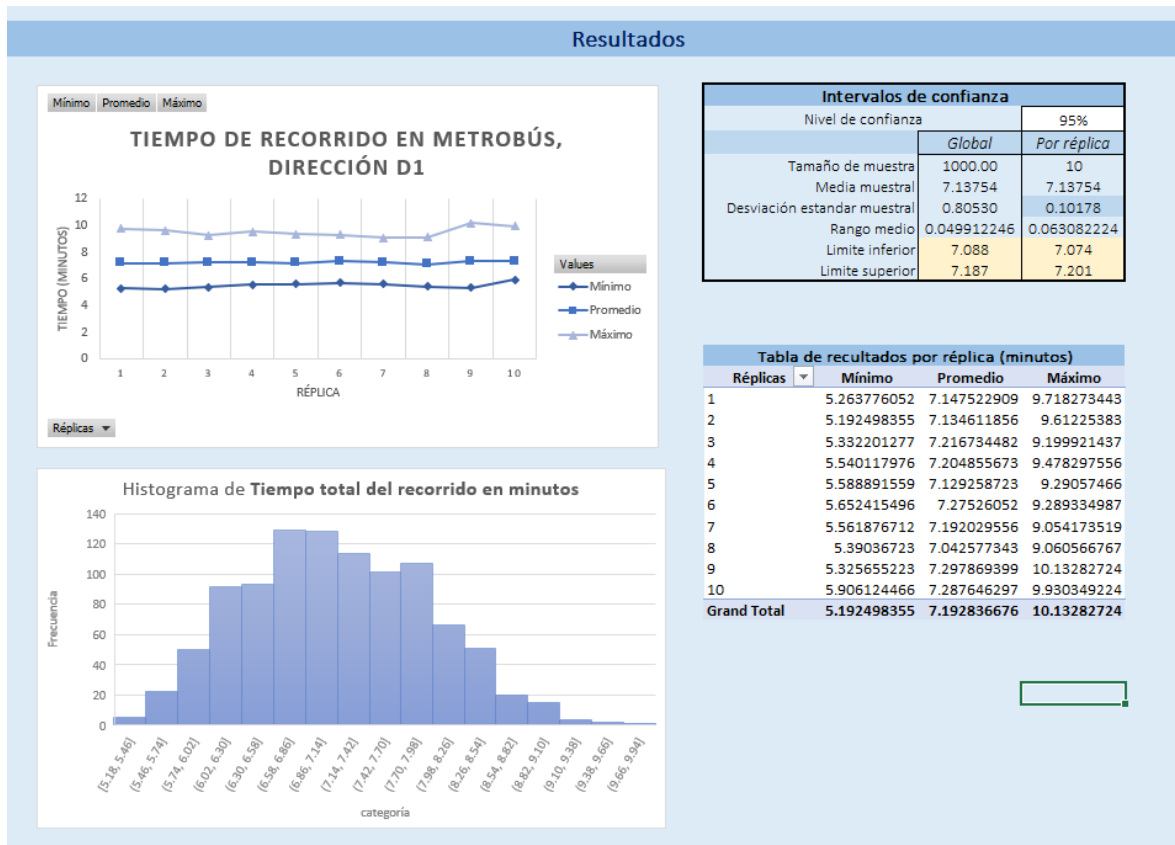


Figura 6-15 Resultados del modelo M2.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

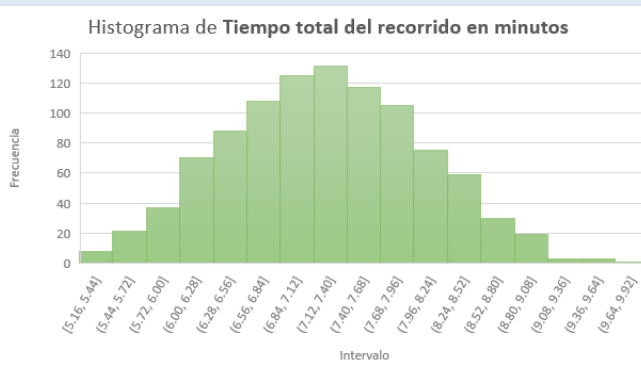
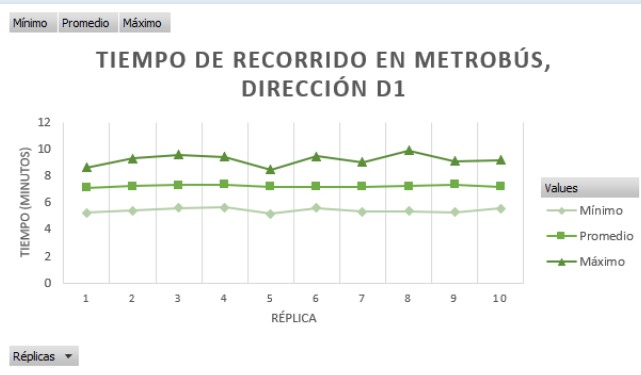
Por medio de la interacción con el modelo se observó que los intervalos de confianza generalmente presentan similitud en el valor inferior y superior que los define, y a medida que el número de datos por réplica aumenta, la diferencia es cada vez menor. Los principales resultados de este modelo se obtienen al considerar  $r=10$  y  $d=100$  y se presentan a continuación.

Para el recorrido en dirección d1 (Figura 6-16), el tiempo promedio de recorrido es 7.22 minutos y ambos intervalos de confianza son iguales, [7.172, 7.273]. La idea intuitiva del intervalo de confianza establece que, “si ejecutamos el modelo 100 veces, aproximadamente en 95 de ellas, el valor promedio será un valor dentro de [7.172, 7.273].”.

Si comparamos la gráfica del tiempo de recorrido donde se grafican los valores mínimo, promedio y máximo entre la Figura 6-15 y la Figura 6-16, podemos notar que en la primera, los tres valores presentan variabilidad y que se proyectan como “picos” a lo largo de la gráfica, sin embargo, en la segunda gráfica, el valor promedio presenta menor discrepancia y se gráfica casi como una línea recta horizontal a través de las 10 réplicas, lo que significa estabilidad en dicho valor. En este último caso, el valor máximo es el que continua con un comportamiento inestable.

Del histograma (Figura 6-16) podemos inferir que los tiempos presentan una distribución casi simétrica. El comportamiento de esta variable puede ser formalizada por medio de una prueba de bondad de ajuste a la distribución normal (una distribución simétrica). Sin embargo, en este trabajo, el ajuste se omite y se tomará como dato representativo la media y su intervalo de confianza.

## Resultados d1



Intervalos de confianza		
Nivel de confianza	95%	
	Global	Por réplica
Tamaño de muestra	1000.00	10
Media muestral	7.22242	7.22242
Desviación estandar muestral	0.81026	0.08084
Rango medio	0.050219476	0.05010287
Limite inferior	7.172	7.172
Limite superior	7.273	7.273

Tabla de resultados por réplica (minutos)			
Réplicas	Mínimo	Promedio	Máximo
1	5.230244117	7.098644647	8.626898116
2	5.385534498	7.230392185	9.281116483
3	5.606364892	7.289797334	9.553698057
4	5.616012001	7.34181349	9.413449144
5	5.160620159	7.178096841	8.456530171
6	5.606204899	7.194536512	9.427004835
7	5.294624732	7.164439011	8.998049794
8	5.349044431	7.22130505	9.871338914
9	5.270266479	7.343987854	9.079170966
10	5.541102982	7.161178345	9.157146904
<b>Grand Total</b>	<b>5.160620159</b>	<b>7.222419127</b>	<b>9.871338914</b>

Figura 6-16 Resultados del modelo M2 para el recorrido en dirección d1.

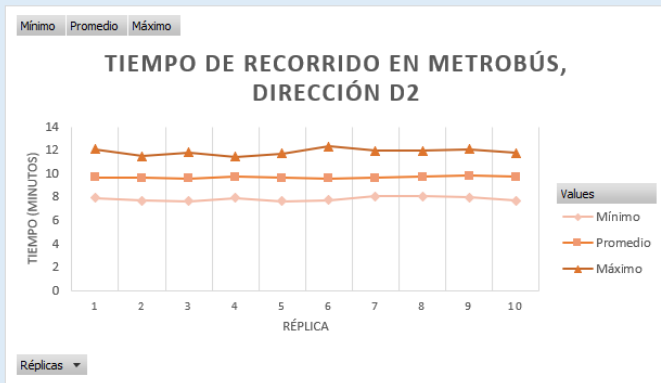
Fuente: Elaboración propia (2020).

Los resultados del recorrido en dirección d2 (Figura 6-17) se interpretaron de manera similar. La media resultó ser 9.66 minutos. Pero a diferencia de los resultados en d1, los intervalos de confianza no resultaron iguales y en este caso será considerado el segundo, [9.620, 9.713]. El histograma no presenta simetría, sino sesgo hacia la izquierda, el cual sugiere una distribución como la gamma, lognormal o beta, que representan adecuadamente dicho comportamiento de los datos.

En resumen, el tiempo de recorrido en d1 resultó menor en d1 (7.22 m) y mayor en d2 (9.66 m) con una diferencia de aproximadamente 2.5 minutos. A pesar de que la distancia en d2 también es mayor que en d1, la velocidad media del recorrido completo es también mayor para d2. A continuación, la Gráfica 6-17 nos permite comparar la distancia, tiempo y velocidad media<sup>45</sup> de operación que se estima para los recorridos d1 y d2 de la propuesta.

<sup>45</sup> A pesar de que la velocidad media se presenta en m/s, la distancia y tiempo de recorridos se presentan en escala de km y minutos respectivamente, con la intención de uniformizar la magnitud de escalas y hacer posible la comparación en la Gráfica 6-17.

## Resultados d2



Intervalos de confianza		
Nivel de confianza	95%	
	Global	Por réplica
Tamaño de muestra	1000.00	10
Media muestral	9.66666	9.66666
Desviación estandar muestral	0.86966	0.07521
Rango medio	0.053901168	0.046615207
Limite inferior	9.613	9.620
Limite superior	9.721	9.713

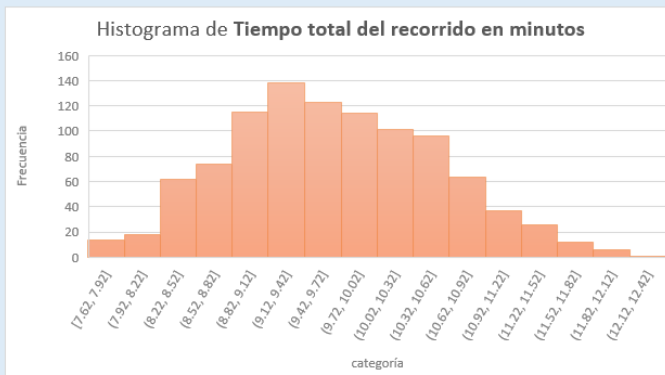
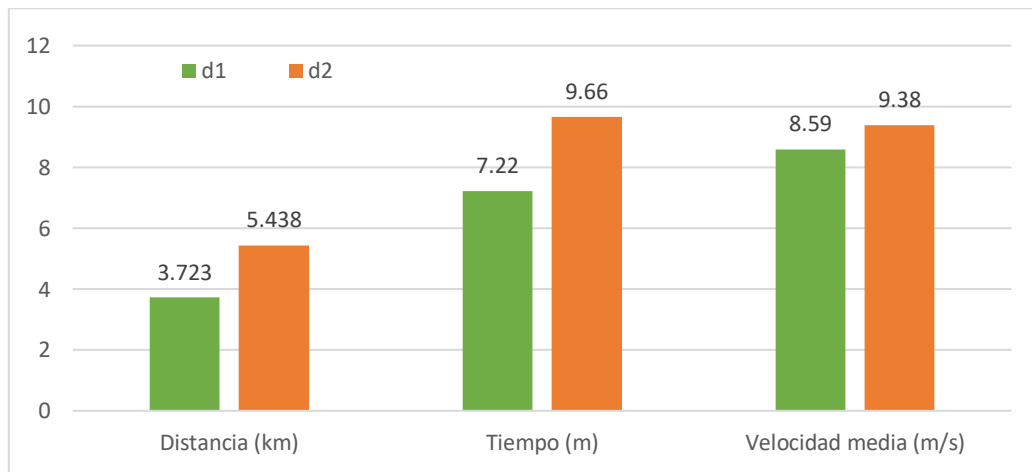


Tabla de resultados por réplica (minutos)			
Réplicas	Mínimo	Promedio	Máximo
1	7.917051054	9.659475203	12.10018606
2	7.685400151	9.610012538	11.47561819
3	7.619113353	9.587484881	11.79425564
4	7.916502331	9.729705954	11.42648536
5	7.634598491	9.622915592	11.71422532
6	7.721628489	9.564660871	12.33419212
7	8.05730723	9.650151152	11.92257824
8	8.051716883	9.736740433	11.94454065
9	7.97771188	9.80317123	12.09786425
10	7.663256529	9.70228655	11.77310757
<b>Grand Total</b>	<b>7.619113353</b>	<b>9.66666044</b>	<b>12.33419212</b>

Figura 6-17 Resultados del modelo M2 para el recorrido en dirección d2.

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 6-17 Distancia, tiempo y velocidad media de recorridos en UMB (d1 y d2)

Fuente: Elaboración propia (2020).

Ahora bien, tomando estos resultados, a continuación, se hará una comparación del tiempo y velocidad promedio entre los recorridos que actualmente se realizan en UTP y los recorridos propuesto en UMB que conectan CETRAM Universidad con la línea 1 del Metrobús.

De la Figura 6-18 podemos observar que los recorridos actuales de camiones y vagonetas conectan a la línea 1 del Metrobús en la estación Perisur, mientras que en el recorrido que se propone, la conexión es en la estación Centro cultural universitario CCU. Los recorridos en camión son los de duracion más larga (15.15 minutos) mientras que en vagonetas y UMB, los recorridos tiene duración similar de aproximadamente 9.6 minutos. Sin embargo notemos que los recorridos en vagonetas son los mas cortos y en UMB son los máxima longitud. Por otro lado, un parámetro que relaciona las magnitudes de tiempo y distancia es la velocidad. En este caso, podemos notar que los recorridos en UMB pueden alcanzar valocidades superiores a las de camiones y vagonetas.

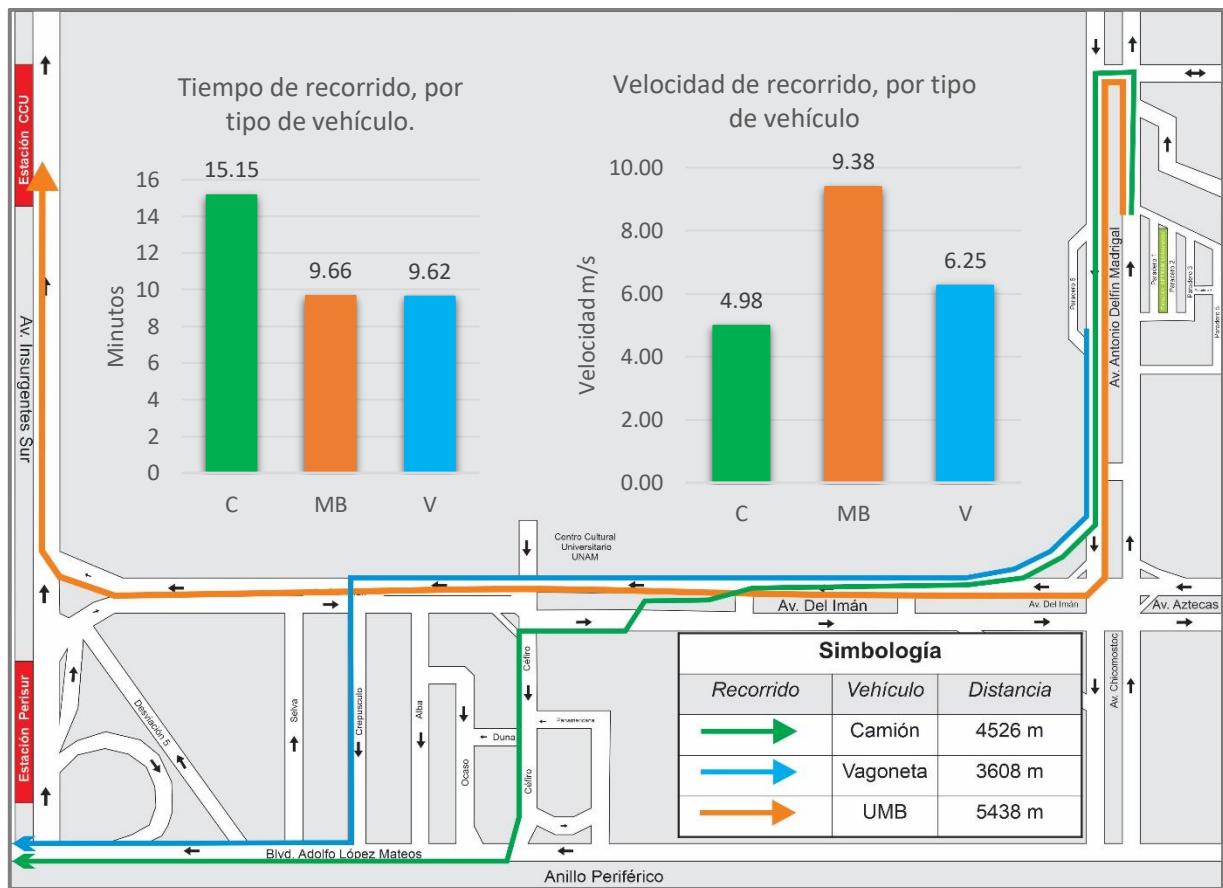


Figura 6-18 Recorrido de UTP y UMB desde CETRAM Universidad hasta la línea 1 del Metrobús. Fuente: Elaboración propia (2020).

Respecto a los recorridos que hacen la conexión desde la línea 1 Metrobús, a CETRAM Universidad, tenemos la Figura 6-19, donde podemos observar que se trata de recorridos similares para los tres tipos de vehículos. La duración de recorridos es menor en UMB, seguida de los recorridos en vagonetas, mientras que los recorridos en camión son nuevamente los de mayor duración. En cuanto a la velocidad media de operación, los recorridos en UMB alcanzan mayor velocidad que camiones y vagonetas.

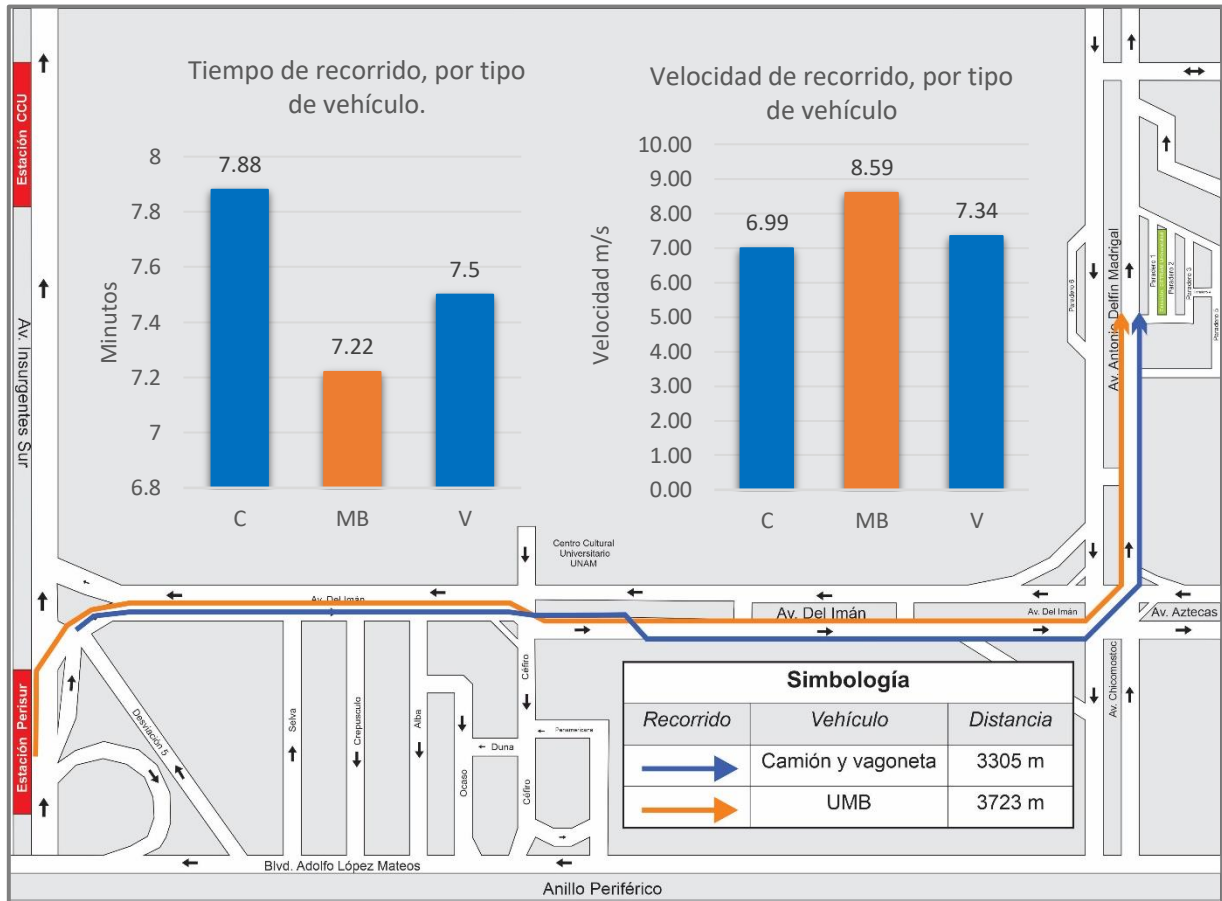


Figura 6-19 Recorridos de UTP y UMB desde la línea 1 del Metrobús hasta CETRAM Universidad.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

## 6.3 Modelo M3

### Descripción general

Al igual que M2, se trata de un modelo simple, del tipo Monte Carlo, implementado en Excel. El modelo de simulación M3 se complementa con un modelo de Programación Lineal Entera (PLE) con el objetivo de validar sus resultados simultáneamente. El propósito de ambos modelos es estimar la cantidad de UMB necesarias para satisfacer la demanda de usuarios de los recorridos R4 y R5<sup>46</sup>, resultado principal del modelo M1<sup>47</sup>. La condición de paro del modelo de simulación es satisfacer la demanda, D, definida como un parámetro de entrada.

A lo largo de esta discusión se presentan las características y las variables de cada modelo. La principal diferencia entre ambos es que, en el enfoque de simulación, en cada réplica independiente puede obtenerse una solución diferente, mientras que en el modelo PLE se obtiene una única solución.

### Propósito

Estimar la cantidad de Unidades de Metrobús que se requieren para satisfacer la demanda actual de viajes entre la estación Perisur del Metrobús y CETRAM universidad.

### Supuestos y consideraciones

- La demanda por satisfacer en los recorridos R4 y R5, se toma como la mayor demanda de los recorridos en sentido S1 y S2, considerando que las UMB que realizan el recorrido d1 son las mismas unidades que posteriormente realizarán d2, así, si se satisface la mayor demanda, automáticamente se satisfacen las demanda en ambos sentidos del recorrido.
- Se considera un factor de carga<sup>48</sup>,  $\alpha$ , menor que 1. Esta consideración tiene dos razones:
  - Lograr la comodidad de los usuarios al viajar en UMB no saturadas.
  - Permitir holgura en cada UTP, teniendo en cuenta que la demanda en cualquier sentido de los recorridos (S1, S2) puede incrementarse. Estudios referentes a la atracción de viajes pueden ayudar en la calibración de este parámetro.
- Se considera que la demanda de usuarios se distribuye uniformemente en el tiempo, por lo que, en cada una de las UBM se utilizan todos los espacios disponibles, respetando el factor de carga.

---

<sup>46</sup> Los recorridos R4 y R5 se presentan en la pág. 74

<sup>47</sup> El modelo M1 es presentado en la sección 6.1 (pág. 114). Sus principales resultados se discuten en la pág. 132.

<sup>48</sup> El *factor de carga*, denotado por  $\alpha$  y también llamado *coeficiente de utilización*, es la relación que existe entre la capacidad utilizada de la UTP y la oferta ofrecida por el sistema de transporte público. Se obtiene como:

$$\alpha = \frac{\text{Personas transportadas}}{\text{Espacios Ofrecidos}}, \text{ (Vuchic, 2005).}$$

- La capacidad vehicular,  $C$ , varía de acuerdo con el tipo de vehículo. Para los autobuses articulados se consideran 160 espacios y para los biarticulados 240, de acuerdo con las características actuales de las unidades en operación en la línea 1 del MB (ver pág. 93).
- Los espacios disponibles en una UMB se calculan como  $E = \alpha \times C$ . Cuando  $E$  resulta en un valor no entero, será tomado el valor entero menor más próximo.
- El término *disponibilidad* se refiere al porcentaje de UMB de 2 y 3 vagones que se pueden considerar en los modelos. Por ejemplo, si las disponibilidades de los autobuses articulados es 40%, significa que de todas las unidades que realizan recorridos, el 40% son articulados (de dos vagones). De tal manera que se cumple lo siguiente:

$$\begin{array}{l} \text{disponibilidad de UMB} \\ \text{de dos vagones} \end{array} + \begin{array}{l} \text{disponibilidad de UMB} \\ \text{de tres vagones} \end{array} = 100\% \quad (4)$$

- La *disponibilidad* es un parámetro fijo en el modelo de simulación. Mientras tanto, en el modelo PLE, la *disponibilidad* de UMB se establece por medio de un pequeño intervalo, ya que, de lo contrario, un parámetro fijo de disponibilidad representa una zona factible muy pequeña y en ocasiones vacía.

### VARIABLES DE LOS MODELOS

Para ambos modelos se definen las siguientes variables:

- *Variables de salida*  
 X2: Cantidad de UMB de dos vagones (autobuses articulados)  
 X3: Cantidad de UMB de tres vagones (autobuses biarticulados)
- *Variables de entrada*  
 D: Demanda a satisfacer  
 $\alpha$ : Factor de carga  
 Ci: Capacidad de una UMB de i vagones  
 Di: Disponibilidad de una UMB de i vagones  
 Ei: Espacios disponibles en una UMB de i vagones
- *Variables auxiliares en el modelo de simulación*  
 P: Pasajeros transportados  
 E: Espacios disponibles en una UTP (de dos o tres vagones)

## Modelo conceptual y estructura del modelo de simulación

El modelo conceptual correspondiente al modelo de simulación es simple, consiste en la generación aleatoria y repetida de variables que definen las características de cada UTP, de acuerdo con los parámetros de entrada, hasta cumplir con la demanda D (Figura 6-20).

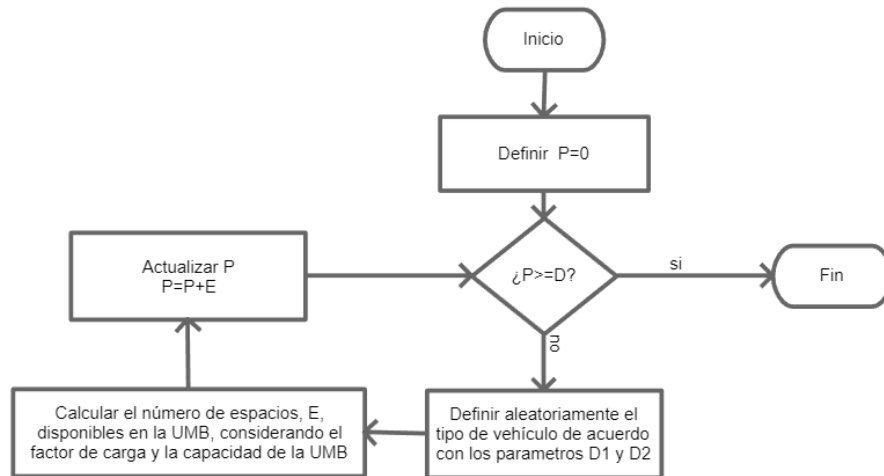


Figura 6-20 Estructura del modelo de simulación M3

Fuente: Elaboración propia.

## Estructura del modelo de PLE

Se trata de un modelo con dos variables de decisión enteras,  $X_2$ ,  $X_3$ , que representan la cantidad de UMB de dos y tres vagones, respectivamente. El modelo se plantea como uno en el que se busca minimizar la función objetivo, en este caso, la cantidad total de UMB's,  $Z=X_2+X_3$ , que se requieren para satisfacer la demanda D, considerando la capacidad de las UTP y el factor carga  $\alpha$ .

Por definición, las disponibilidades  $D_2$  y  $D_3$  se expresan como sigue

$$D_2 := \frac{X_2}{X_2 + X_3} = \frac{X_2}{Z} \quad (5)$$

$$D_3 := \frac{X_3}{X_2 + X_3} = \frac{X_3}{Z} \quad (6)$$

Para este modelo,  $D_2$  y  $D_3$ , serán definidos dentro de un pequeño intervalo, dando flexibilidad al PLE. Consideremos que  $D_2$  y  $D_3$  pertenecen a los siguientes intervalos

$$D_2 \in [Li_2, Ls_2] \rightarrow Li_2 \leq D_2 \leq Ls_2 \quad (7)$$

$$D_3 \in [Li_3, Ls_3] \rightarrow Li_3 \leq D_3 \leq Ls_3 \quad (8)$$



De lo anterior, es posible obtener cuatro restricciones para el modelo PLE; dos se obtienen al igualar la última expresión de ( 5 ) con las dos desigualdades de ( 7 ). Análogamente se obtienen dos restricciones con ( 6 ) y ( 8 ). Con esto, la estructura del modelo de PLE correspondiente es la siguiente

*Funcion objetivo = Z*

*Variables de decisión: X2, X3*

*Restricciones:*

$$R1: X1 + X2 - Z = 0$$

$$R2: X2 - Li_2 * Z \geq 0$$

$$R3: X2 - Ls_2 * Z \leq 0$$

$$R4: X3 - Li_3 * Z \geq 0$$

$$R5: X3 - Ls_3 * Z \leq 0$$

$$R6: E2 * X2 + E3 * X3 \geq D$$

$$R7: X1, X2 \in Z^+$$

Las restricciones R2-R5 corresponden a la disponibilidad de UMB. R6 es la restricción relacionada con hacer cumplir la demanda D y R7 establece que X1 y X2 deben ser variables enteras no negativas

La razón por la que en este modelo se utilizan intervalos para definir la disponibilidad de las UTP, es que los intervalos dan flexibilidad en la solución del modelo, ya que, si la disponibilidad se define como un parámetro fijo el modelo es demasiado restrictivo. En tal caso, la solución que se obtiene cumple todas las restricciones, en particular R6, que corresponde a cumplir la demanda actual D, sin embargo, la cantidad de espacios disponibles que involucra dicha solución sobrepasa por mucho a D, y esto convierte la solución en una de poca utilidad para los objetivos detrás del modelo. Si, además, R6 se convierte en una restricción de igualdad estricta, entonces el modelo no tiene solución cuando D2=32% y D3=68%.

### Validación y verificación

La verificación, al igual que en M1 y M2, se realizó al eliminar errores de sintaxis. En cuanto a la validación, ambos modelos fueron validados al comparar los resultados obtenidos en cada modelo a partir de los mismos parámetros de entrada.

### Resultados del modelo

A continuación, se presenta el formato de resultados que se obtiene en el modelo de simulación y en el modelo PLE, considerando como parámetros de entrada: D= 3526, disponibilidad de UMB articulados= 32% y un factor de carga  $\alpha=85\%$ . Posteriormente se discuten los resultados finales obtenidos de ambos modelos para nueve escenarios distintos.

#### ❖ *Resultados del modelo de simulación*

Una réplica del modelo de simulación indica que se requieren 20 UMB para satisfacer la demanda; 6 de dos vagones y 14 de tres que representan el 30% y el 70 % del total de UMB (ver Figura 6-21). Notemos que estos porcentajes se aproximan a los parámetros D1=32% y D2=68% pero no son iguales. Esta combinación de los valores de X2 y X3 implica un excedente de 146 lugares, adicionales a la demanda.

Este modelo arroja diferentes soluciones en diferentes réplicas y, en consecuencia, los porcentajes de disponibilidad de la solución también cambian. En otras réplicas, con los mismos parámetros de entrada, se obtuvo 18, 19, 20, 21 y 22 como la cantidad total de UMB requeridos. Para analizar la frecuencia de cada posible resultado, el modelo cuenta con el botón “Conjunto de réplicas” (ver Figura 6-21) que permite analizar los resultados de 1000 réplicas. Ejemplo de este análisis se aprecia en la Figura 6-22, donde, la tabla de la izquierda almacena el resultado individual de cada réplica, y tanto la gráfica como las tablas de la derecha permiten analizar el comportamiento conjunto de las 1000 réplicas.

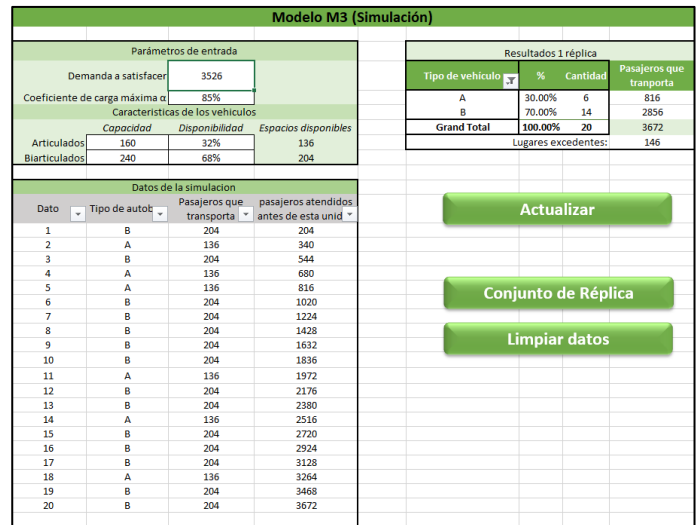


Figura 6-21 Modelo de simulación M3  
Fuente: Elaboración propia (2020).

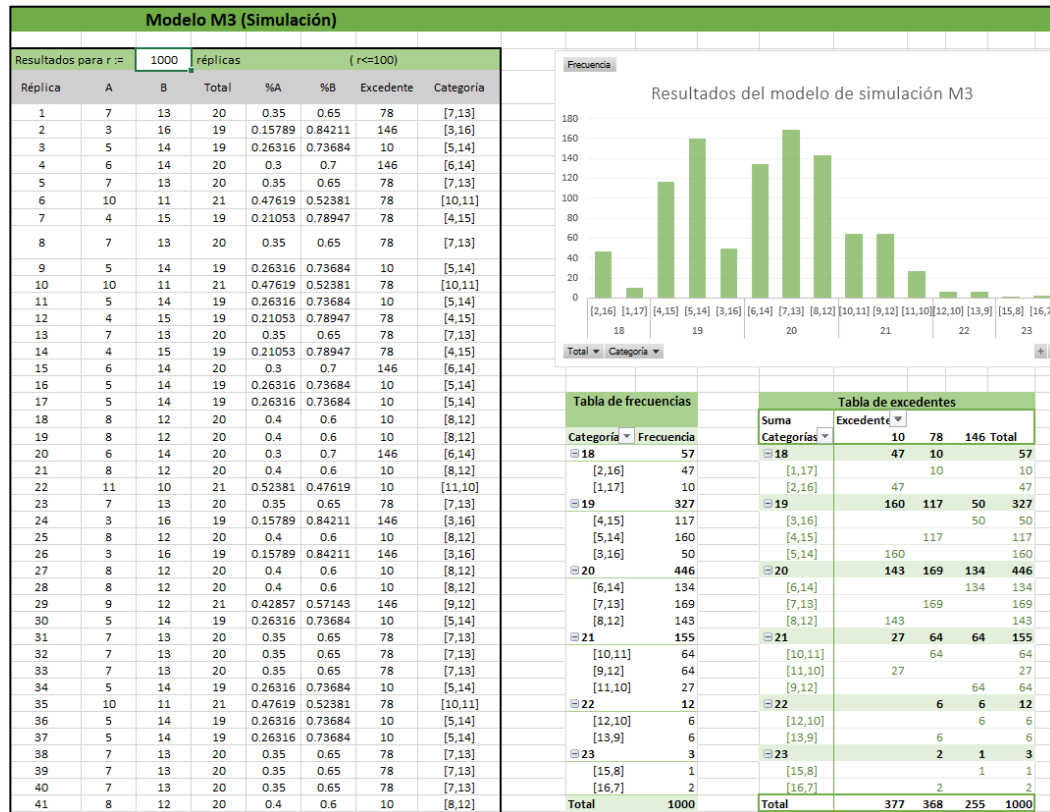


Figura 6-22 Análisis de conjuntos de 1000 réplicas del modelo de simulación M3  
Fuente: Elaboración propia (2020).

De la gráfica (Figura 6-22) se observa que existen diferentes combinaciones de los valores X2 y X3 que resultan en la misma cantidad total. Por ejemplo, existe tres combinaciones diferentes que indican que la cantidad total de UTP requeridos es 20, estas combinaciones son: [6,14], [7,13] y [8,12]. Como resultado representativo, en este modelo, se toma la categoría con mayor frecuencia, que en este ejemplo corresponde a la combinación [7,13].

❖ *Resultados del modelo de programación lineal entera*

La Figura 6-23 presenta los resultados del modelo PLE, considerando los parámetros de entrada mencionados anteriormente. Recordemos que a partir de los valores  $D2=32\%$  y  $D3=68\%$ , definimos dos intervalos,  $[Li_2, Ls_2]$  y  $[Li_3, Ls_3]$ , cuyos límites son establecidos como parámetros de entrada.

En la tabla de la derecha (Figura 6-23) podemos observar los resultados obtenidos al variar la longitud de intervalos, tomando los límites:  $D2 \pm i$  y  $D3 \pm i$ , para  $i=0,1,2,3$ . Por ejemplo, para  $i=3$ ,  $D2 \pm 3$  y  $D3 \pm 3$  definen los intervalos  $[29,35]$  y  $[65,70]$ . Al evaluar estos parámetros de entrada en el modelo, con  $\alpha=85\%$ , obtenemos la misma combinación que en el modelo de simulación, pero a medida que el valor de  $i$  disminuye, la longitud del intervalo es menor, el conjunto de soluciones factible se hace más pequeño y la combinación resultante cambia y establece mayor excedente, (ver tabla “Análisis de resultados” y gráfica en Figura 6-23).

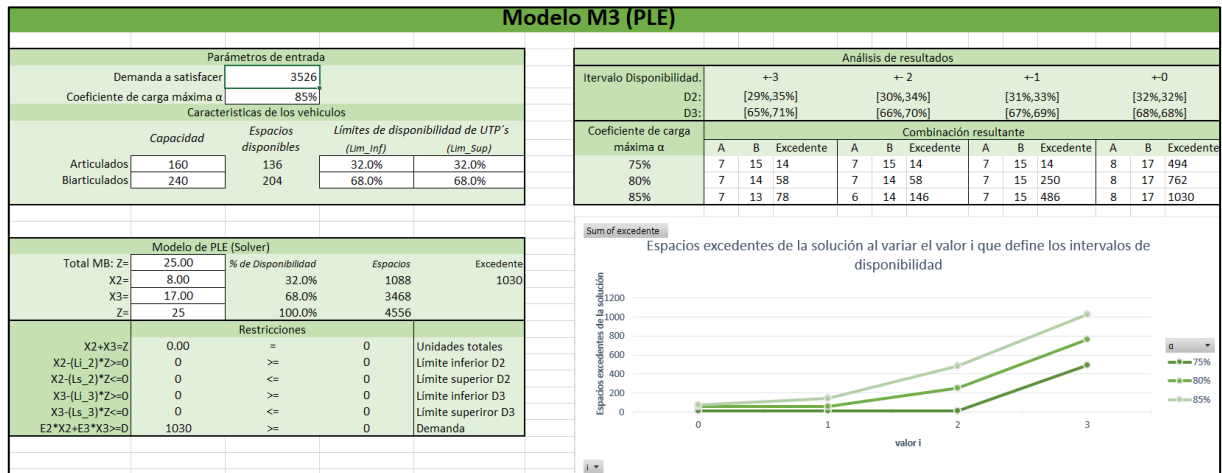


Figura 6-23 Modelo de Programación lineal entera M3  
Fuente: Elaboración propia (2020).

**Análisis y discusión de resultados**

A continuación, se presentan tres situaciones distintas, en las que, la demanda a satisfacer se mantiene fija ( $D=2536$ ), pero la disponibilidad de UMB articulados y biarticulados varía:

*Situación 1:* Operación total de UMB de 2 vagones.

*Situación 2:* Operación total de UMB de 3 vagones, y

*Situación 3:* Disponibilidad del 32% para UMB de dos vagones (68%, UMB de tres vagones).

Las dos primeras situaciones son casos donde se considera la operación de un único tipo de UMB (articulados o biarticulados). En la tercera situación se consideran ambos tipos de UMB, de acuerdo con la disponibilidad observada en el periodo de recolección de datos (ver sección 4.4.3, pág.93)

Además de la variación en los parámetros de disponibilidad de UMB, en cada situación, el valor  $\alpha$  fue considerado en tres niveles: 0.75, 0.80 y 0.85. Las combinaciones diferentes de los parámetros de entrada dan origen a nueve escenarios que conforman un diseño experimental  $3^2$ , donde los factores variables son:

la disponibilidad de las UMB de dos vagones (valor que define como complemento de 1 la disponibilidad de UMB de tres vagones), y el factor de carga ( $\alpha$ ), cada factor evaluado en tres niveles.

Los parámetros de entrada de cada escenario se evaluaron en ambos modelos, tomando en el modelo PLE los intervalos definidos por  $D2 \pm 3$  y  $D3 \pm 3$ . Una vez calculada la cantidad total de UMB requeridas, se calculó el *intervalo de operación*,  $h^{49}$ , el cual fue considerado uniforme y se calculó a partir de la siguiente expresión

$$h = \frac{60 \text{ min}}{UMB} \quad (9)$$

En resumen, la Tabla 6-15 presenta las características y resultados de los nueve escenarios. Notemos que, la cantidad total de UMB requerida resultó igual en ambos modelos, para todos los escenarios. Sin embargo, la combinación que define esta cantidad es diferente en E7, ya que en el modelo de simulación la combinación con mayor frecuencia fue [6,16] y la solución en el modelo PLE fue [7,15].

**Tabla 6-15 Resultados de los modelos M3 para 9 escenarios.**

Demanda: 3526 espacios							
Escenarios	Parámetros			Resultados: Combinación [X2, X3]		Total X2+X3	Intervalo de operación, h, en minutos
	Coeficiente de Carga	Disponibilidad de Autobuses		Modelo simulación	Modelo PL (Solver)		
		Articulados	Biarticulados				
E1	0.75	100%	0%	[30,0]	[30,0]	30	2.00
E2	0.8	100%	0%	[28,0]	[28,0]	28	2.14
E3	0.85	100%	0%	[26,0]	[26,0]	26	2.31
E4	0.75	0%	100%	[0,20]	[0,20]	20	3.00
E5	0.8	0%	100%	[0,19]	[0,19]	19	3.16
E6	0.85	0%	100%	[0,18]	[0,18]	18	3.33
E7	0.75	32%	68%	[6,16]	[7,15]	22	2.73
E8	0.8	32%	68%	[7,14]	[7,14]	21	2.86
E9	0.85	32%	68%	[7,15]	[7,15]	20	3.00

Fuente: Elaboración propia

En síntesis, la menor y mayor cantidad de UMB requeridas para satisfacer la demanda se obtuvieron en los escenarios E6 y E1, respectivamente. La menor cantidad es 18 y define el mayor intervalo,  $h=3.33$  minutos, mientras que 30 UMB definen el menor intervalo  $h=2$  minutos. Ambos escenarios pertenecen a situaciones donde solo se considera un único tipo de autobuses.

En los casos con disponibilidad de ambos tipos de autobuses se obtuvo 20, 21 y 22 como la cantidad total necesaria para satisfacer la demanda. En los nueve escenarios el intervalo  $h$  se encuentra entre 2 y 3.3 minutos, un intervalo de operación aceptable y atractivo para los usuarios.

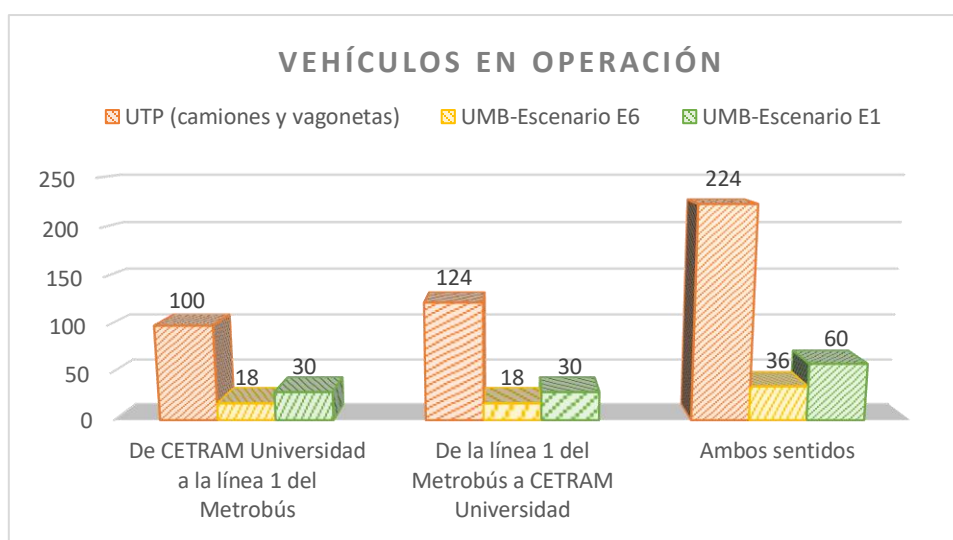
<sup>49</sup> El intervalo de operación, denotado por  $h$ , es el intervalo de tiempo entre el momento en que dos unidades de transporte pasan por un punto fijo en una línea de tránsito en la misma dirección (Vuchic, 2005). Suele expresarse en minutos.

Considerando los escenarios E1 y E6, que definen estos intervalos, la Tabla 6-16 y la Gráfica 6-18 presentan una comparación entre la cantidad de UTP<sup>50</sup> y UMB que actualmente operan y se requieren para satisfacer la demanda de pasajeros entre la línea 1 del Metrobús y CETRAM Universidad.

**Tabla 6-16 Demanda y unidades de transporte público en operación. Situación actual y propuesta**

Situación	Demanda actual	3526	3326	6852
	Vehículo/ Dirección del recorrido	De CETRAM Universidad a la línea 1 del Metrobús	De la línea 1 del Metrobús a CETRAM Universidad	Total
Actualidad	Camiones	77	118	195
Actualidad	Vagonetas	23	6	29
Actualidad	UTP (camiones y vagonetas)	100	124	224
Propuesta	MB-Escenario E6 (M3)	18	18	36
Propuesta	MB-Escenario E1 (M3)	30	30	60

Fuente: Elaboración propia (2020).



Gráfica 6-18 Vehículos en operación, situación actual (UTP), situación propuesta (E6 y E1)  
Fuente: Elaboración propia (2020).

De la Gráfica 6-18 se aprecia que la propuesta de este trabajo implica disminuir las unidades de transporte público entre CETRAM universidad y la línea 1 del Metrobús. Se habla de reducir entre 164 y 168 UTP en promedio (por hora) en ambos sentidos del recorrido.

Entonces, además de que los recorridos en UMB propuestos resultan atractivos para los usuarios respecto a su velocidad y duración, la propuesta en general implica la reducción de vehículos en circulación en toda la región de estudio.

<sup>50</sup> La cantidad de UTP (camiones y vagonetas) que actualmente operan en el recorrido mencionado es un resultado del modelo M1 (ver pág. 132)

## 6.4 Modelo M4

### Descripción general

El modelo M4 tiene como objetivo analizar el comportamiento conjunto de vehículos particulares y unidades de transporte público, por esta razón la técnica de implementación es la simulación de agentes. El modelo considera únicamente secciones de las zonas 4 y 5 de la región de estudio, ya que son las zonas donde actualmente se aprecia mayor congestión vehicular y la propuesta provoca mayor impacto. El modelo fue implementado en la plataforma de Anylogic (versión personal gratuita) que cuenta con herramientas gráficas que permiten visualizar el movimiento de los agentes dentro del sistema. Una de las ventajas de este software es que cuenta con herramientas visuales que permiten observar el comportamiento de los agentes (vehículos) dentro del sistema (calles), de manera que la verificación del modelo fue posible mediante la comparación visual con respecto a la situación actual. Además, es posible obtener gráficas que apoyan a la interpretación de resultados.

El sistema simulado se compone de la infraestructura de las calles que actualmente existen, sus intersecciones y los vehículos que las utilizan. Los vehículos del modelo se clasifican en dos categorías: **UTP** (camiones, microbuses y vagonetas) y **Carros** (cualquier otro tipo de vehículo que no se utiliza como unidad de transporte público). A lo largo de la descripción de este modelo, se hace referencia a diversas secciones del capítulo 4, *Descripción de la región de estudio*, en donde se describe detalladamente el comportamiento vehicular, tanto de *UTP* como de *Carros*, por lo que se recomienda revisarlo previamente.

El modelo consta de dos etapas. En la primera, se elabora una réplica de la situación actual en el área correspondiente, utilizando información proveniente de videograbaciones. En la segunda etapa, se realizan modificaciones referentes a la operación de UTP (con estación terminal en CETRAM Universidad y CETRAM Taxqueña), y posteriormente se compara con el comportamiento de la situación actual.

### Propósito

Este modelo tiene dos propósitos:

- I. Visualizar y analizar el comportamiento del flujo vehicular de UTP, en conjunto con vehículos de otro tipo, en la calle Céfiro y Blvd. Adolfo López Mateos (Anillo Periférico<sup>51</sup>).
- II. Comparar el comportamiento del flujo vehicular al reducir los recorridos de UTP.

### Modelo conceptual

Como parte del modelo conceptual se tiene la Figura 6-24, donde se muestran los puntos de entrada y salida vehicular correspondientes al área considerada en el modelo. Básicamente se trata de las zonas 3, 4 y 5, cuya descripción se presenta en las secciones 4.2.3, 4.2.4 y 4.2.5 (Pág. 55), respectivamente. Además

---

<sup>51</sup> El Blvd. Adolfo López Mateos es el nombre de la sección del Anillo Periférico que forma parte de la región de estudio, sin embargo, ocasionalmente se utilizará el término *Periférico* para referir dicha sección del Blvd.

de estas secciones, se recomienda ver la sección 4.3.1 (pág. 71) donde se presentan las características de operación de los recorridos de UTP provenientes de CETRAM Universidad y CETRAM Taxqueña.

La Figura 6-24 indica la ubicación de tres paraderos importantes para todas las rutas involucradas: uno sobre la calle Céfiro (P5<sup>52</sup>) y dos sobre Blvd. Adolfo López Mateos (P6 y P7). Cabe mencionar que, aunque el punto de salida sobre Periférico tiene dos destinos (Periférico e Incorporación 18), en el modelo M4 se consideran conjuntamente, ya que el comportamiento de vehículos no es de interés después del paradero Perisur.

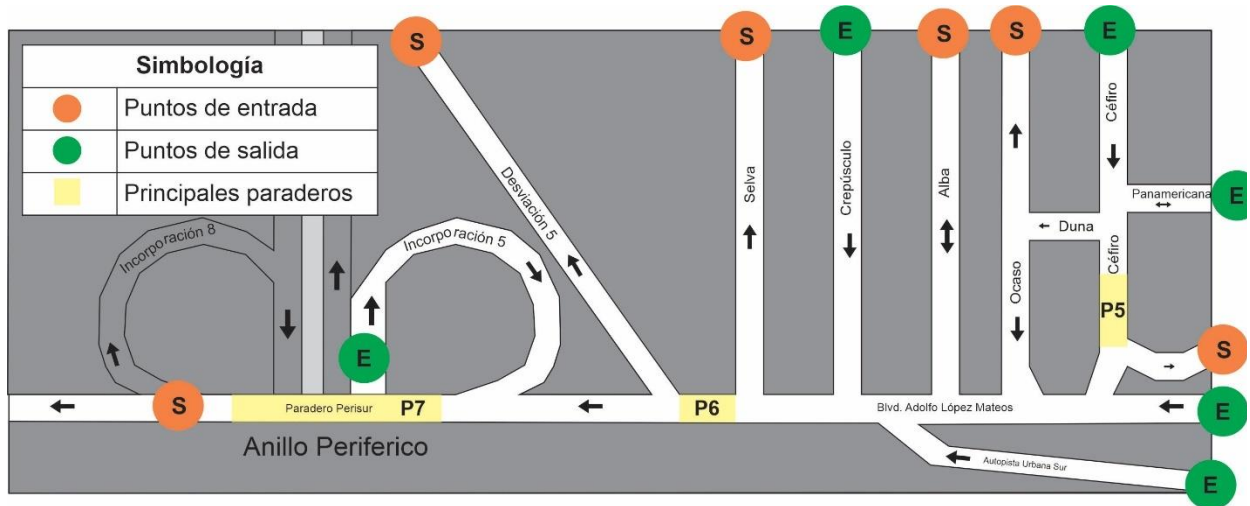


Figura 6-24 Modelo conceptual del modelo de simulación M4  
Fuente: Elaboración propia (2020).

### Consideraciones generales

- A pesar de que la clasificación de vehículos utilizada para el análisis de videograbaciones considera 7 categorías (Camión, Vagoneta, Taxi, Camión Particular, Vagoneta Particular, Motocicleta, y Otro tipo de vehículos), en este modelo, únicamente se consideran:
  - *UTP*: Camiones, microbuses y vagonetas
  - *Carros*: Cualquier otro tipo de vehículos que no operan como UTP (No incluye motocicletas).
- Con el objetivo de diferenciar *UTP* de diferentes rutas, se definieron cinco clases<sup>53</sup>, con longitudes distintas: Camión Verde (CV, 9 m), Camión Morado (CM, 10 m), Microbús (M, 6 m), Vagoneta (V, 5 m) y RTP (11 m). Mientras tanto, en la categoría *Carros* se consideró una sola clase de longitud=4.5 metros.

<sup>52</sup> La numeración de paraderos de la Figura 6-24 se encuentra en correspondencia con la numeración definida en la sección

*Paradas de los recorridos* (Pág. 79), del recorrido R4-S1, cuyo inicio es en CETRAM Universidad y termina en el Paradero Perisur.

<sup>53</sup> Las clases de UTP coinciden con las definidas en el capítulo 4 (Tabla 4-2 Categorías de los vehículos que operan las rutas de interés dentro de la región de estudio., Pág. 44), pero para este modelo la categoría CM incluye camiones morados chicos y grandes.

- Para las rutas R40, R60, R111, R112 y R76, de CETRAM Universidad, se considera un mismo recorrido, donde es posible realizar las tres paradas, P5, P6 y P7. Análogamente, en las rutas 1.T y 13.T de CETRAM Taxqueña, se considera un solo recorrido con posibilidad de realizar 2 paradas.

### Parámetros de entrada

Los parámetros de entrada de este modelo fueron obtenidos principalmente de videograbaciones, cuya metodología de análisis se describe en la sección 5.2.2 (pág. 108). Los parámetros del modelo se enlistan a continuación.

- La velocidad media de los vehículos se define a partir de la información obtenida al realizar recorridos en camiones y vagonetas (ver Gráfica 4-6, pág. 86).
  - Para camiones y microbuses se considera la velocidad de 6.99 m/s, que corresponde a la velocidad media observada en el recorrido R4-S1 en camiones y microbuses.
  - Para vagonetas y *Carros* se considera 7.34 m/s como la velocidad media. Esta velocidad corresponde a los recorridos R4-S2 en vagonetas y se considera similar para *Carros* porque generalmente en estos recorridos no se realizan paradas.
- En el modelo se consideran 8 recorridos distintos de UTP. Dado que el aspecto visual es un elemento importante en este modelo, las UTP de cada recorrido se representaron con distintos colores, de acuerdo con la Tabla 6-17, donde además se presentan los puntos de entrada y salida, las paradas que se realizan en cada recorrido y los parámetros que definen la cantidad de UTP que entran al sistema.

Tabla 6-17 Características de los recorridos de UTP en el modelo M4.

Recorrido	Entrada	Salida	Porcentaje de UTP que realizan parada <sup>54</sup>			Rutas	Clase de UTP	Tiempo entre llegadas (minutos)	Entradas por Hora
			P5	P6	P7				
R1	Panamericana	Oxxo	50%	NA	NA	R1.2	CM	PERT(6,9,8) <sup>55</sup>	
R2	Céfiro	Periférico	100%	32%	100%	R60P	CV	4 min	
R3	Céfiro	Periférico	50%	32%	100%	R60, R76 y R40	CV		42
						R111, R112 y R1.3 (50%)	CM		20
						R1.3 (50%)	M		12
R4	Crepúsculo	Periférico	NA	18%	83%	R76.1	V	PERT(2,3,2.7)	
R5	Periférico	Periférico	NA	88%	100%	R39	CV	PERT(4.26,9.31,6)	
R6	Periférico	Periférico	NA	0%	100%	COPESA	CM		20
						RTP	RTP		11
R7	Periférico	Desviación 5	NA	NA	NA	UNAM y R112	CM		14
R8	Céfiro	Desviación 5	64%	75%	NA	R.TAX (72%)	CM		22
						R.TAX (28%)	CV		9

Fuente: Elaboración propia (2020).

<sup>54</sup> NA indica que el recorrido de la UTP no tiene la posibilidad de hacer la parada y 0% indica que la UTP si tiene la posibilidad, pero no la realiza.

<sup>55</sup> La función PERT es una opción disponible en Anylogic para definir el comportamiento de variables aleatorias. Se define como una distribución beta, cuyos parámetros se obtienen a partir de los valores mínimo, máximo y modal, como se describe en el APENDICE B: DISTRIBUCIÓN BETA.



Algunas rutas presentan recorridos similares, pero operan con diferente clase de UTP, tal es el caso de la ruta R1.3, donde 50% de unidades observadas fueron de la clase CM y 50% de la clase M. Otro caso especial se presenta con las *unidades pirata*<sup>56</sup> de la ruta 60, definidas como R60P, que tienen un recorrido similar a R3, pero difiere en el tiempo de parada en Céfiro y Perisur.

- 3- La cantidad de unidades que entran al sistema fue definida de dos maneras (Tabla 6-17).
- En recorridos asignado a una sola ruta se definió a partir del tiempo entre dos llegas consecutivas, de acuerdo con la información reportada por los despachadores en las entrevistas e información obtenida de las observaciones en videograbaciones.
  - Para recorridos definidos para más de una ruta, se consideró la tasa media de llegadas por hora, obtenida a partir del análisis de videograbaciones en diferentes puntos de la región de estudio.

- 4- La entrada *Carros* también fue definido, por medio del análisis de videograbaciones<sup>57</sup> en distintos puntos de las zonas 3, 4 y 5 (Tabla 6-18). Análogamente se definió el comportamiento de *Carros* en las intersecciones de calles, como lo indica la Tabla 6-19.

**Tabla 6-18 Entrada de Carros en el modelo M4**

<i>Entrada</i>	<i>Vehículos por hora</i>	<i>Video Analizado</i>
E_Céfiro	586	Z3_P1
E_Panamericana	431	Z3_P1
E_Periférico	560	Z4_P5
E_Autopista	556	Z4_P5
E_alba	62	Z4_P5
E_Crepúsculo	586	Z4_P1
E_I5	863	Z5_P6

*Fuente: Elaboración propia (2020).*

**Tabla 6-19 Comportamiento de Carros en Intersecciones de Calles (Modelo M4)**

<i>Video</i>	<i>Desde</i>	<i>Hacia</i>	<i>Porcentajes (%)</i>
Z3_P1	Céfiro (entrada)	Panamericana (Salida)	3.2
		Céfiro (salida)	69.1
		Duna	27.6
Z3_P1	Panamericana	Céfiro (Salida)	17.2
		Duna	82.8
Z4_P6	Céfiro (salida)	Oxxo	32.3
		Periférico	67.7
Z4_P4	Duna	Ocaso (Salida)	59.2
		Ocaso (Periférico)	40.8
Z4_P5	Periférico	Alba	1.7
		Sobre Periférico	98.3
Z4_P7	Periférico	Selva	5.4
		Sobre Periférico	94.6
Z5_P5	Periférico	D5	37.0
		Sobre Periférico	63.0

*Fuente: Elaboración propia (2020).*

<sup>56</sup> Las *unidades piratas* son UTP de la ruta 60 que no operan de acuerdo con el programa oficial de la ruta y cuyo recorrido para los pasajeros comienza al final de la calle Céfiro. Para ver más detalles de la operación de las unidades pirata ver la sección 4.2.3 (Pág. 52).

<sup>57</sup> El análisis de video raciones se describe en la sección 5.2.2 (pág. 108)

- 5- El tiempo de parada de las UTP, se encuentra definido de diferente manera dependiendo del recorrido (ver la Tabla 6-20). En casos, con pocos datos para realizar una prueba de bondad de ajuste, se utilizó la función *PERT*. Un caso particular del uso de esta distribución se presenta en R8-P5, donde los datos mostraron un ajuste adecuado para la distribución normal (ver APENDICE A: AJUSTE DE DATOS), sin embargo, dicha distribución da lugar a valores negativos. Al considerar la distribución *PERT* (o Beta), la distribución de valores muestra simetría, como la distribución normal, sin embargo, ésta acota los valores entre el valor mínimo y máximo, dejando fuera de consideración cualquier valor negativo.

Tabla 6-20 Tiempo de parada, en los recorridos de UTP y Carros

Recorrido	Parada		
	P5	P6	P7
R1	PERT (8.5, 9.4, 8.57)	NA	NA
R2	4	0	PERT (7.26, 28.83, 13)
R3	Lognormal (2.46, 0.65)	Exponencial <sup>58</sup> (5.413, 4.374)	Lognormal (3.249, 0.836)
R4	NA	PERT (6.44, 11.1, 8.89)	PERT (7.26, 28.83, 13)
R5	NA	PERT (5.31, 24.52, 5.5)	Lognormal (3.645, 0.779)
R6	NA	0	PERT (17.73, 98.75, 26.37)
R7	NA	NA	NA
R8	PERT (4.11, 26.68, 13.598)	Lognormal (2.238, 0.5323)	NA
Carros (Autos Particulares y Taxis):			(Weibull, 0.956, 17.146, 4.809)

Fuente: Elaboración propia (2020).

### Estructuración de la simulación

La plataforma de Anylogic permite estructurar la lógica del modelo a través de módulos que desempeñan un conjunto de funciones de acuerdo con los parámetros de entrada que define el usuario. De esta manera es posible especificar el comportamiento de los agentes dentro del sistema. Para la construcción del modelo M4 se utilizó la paquetería *Road Traffic Library* que cuenta con funciones especiales para modelar, simular y visualizar el tráfico de vehículos. Además, la plataforma, permite utilizar elementos de otras librerías para personalizar los modelos.

La Figura 6-25 muestra como ejemplo la estructura de los módulos que definen el comportamiento de *Carros*. Mientras tanto, la Figura 6-26 ilustra el espacio visual por donde transitan los vehículos, el cual fue construido tomando como referencia una imagen de Google Maps donde es posible apreciar la conexión entre calles y avenidas de la zona. Cabe mencionar que al inicio de la Calle Céfiro se consideró el semáforo en el cruce C3<sup>59</sup>, que regula la entrada de vehículos provenientes de Av. del Imán y la zona cultural de la UNAM. Pero los paraderos sobre Céfiro, antes de la calle duna no son considerados, ya que el objetivo es analizar el comportamiento vehicular después de dicha intersección.

<sup>58</sup> El segundo parámetro de la distribución exponencial es el valor umbral de la distribución.

<sup>59</sup> Para conocer detalladamente la operación del ciclo semafórico a la entrada de la calle Céfiro, ver Descripción de la Zona 4(Descripción de la Zona 455)



## Validación y verificación del modelo

El modelo fue validado al observar situaciones similares a las de la situación real, mismas que fueron observadas en el periodo de toma de datos y análisis de videograbaciones. La Figura 6-27 ilustra un escenario tomado de la simulación del sistema actual y relaciona algunas partes del sistema con fotografías del sistema real.



Figura 6-27 Validación del modelo M4  
Fuente: Elaboración propia.

## Resultados del modelo

La versión personal gratuita de Anylogic permite a los modelos de la librería *Road Traffic* simular el sistema real por una hora. En el modelo no se consideró otra condición de paro, por lo que cada réplica corresponde a 60 minutos de simulación. Como resultados del modelo se obtienen dos graficas (ver Figura 6-27). La Gráfica 1 muestra la cantidad total de vehículos que logran salir del sistema en cada minuto de la simulación. De la Figura 6-27 podemos observar que en los primeros 10 minutos de la simulación, se presenta un comportamiento creciente y a partir de ese punto el comportamiento se estabiliza, sin embargo, aún es posible identificar que, de manera menos pronunciada, la gráfica tiende a descender para el minuto 60 de la simulación. El comportamiento ascendente al inicio de la simulación corresponde a un periodo de

calentamiento, ya que al inicio de la simulación el sistema se encuentra completamente vacío, sin ningún vehículo circulando, y es aproximadamente hasta los 10 minutos (de la simulación) que los vehículos logran circular de manera regular por todo el sistema.

Por otro lado, la Gráfica de pastel muestra la cantidad total de vehículos que logran salir del sistema a cada minuto de la simulación, indicando el porcentaje en cada punto de salida. En el ejemplo de la Figura 6-27 podemos apreciar que el principal punto de salida es sobre Anillo periférico, después del paradero Perisur. En segundo y tercer lugar se encuentran la salida por la Desviación 5 y por la calle Ocaso, respectivamente.

Por otro lado, las carreteras del modelo fueron divididas en secciones de 25 m y son coloreadas de acuerdo con la velocidad promedio de los vehículos, considerando que la sección será:

- Verde: Si la velocidad promedio es mayor o igual a un valor  $V_{max}$
- Rojo: Si la velocidad promedio es menor que el valor  $V_{min}$
- Verde claro, amarillo o naranja: Si la velocidad media se encuentra entre los valores  $V_{max}$  y  $V_{min}$ .

Esta coloración nos permite visualizar las zonas de mayor y menor velocidad. Las zonas de menor velocidad se encuentran directamente relacionadas con las zonas de mayor congestión. Los parámetros  $V_{max}$  y  $V_{min}$  se definieron como la velocidad promedio del recorrido completo R4-S1 de camiones (4.9 m/s) y la velocidad promedio del recorrido R4-S1, desde la calle Céfiro, hasta el paradero Perisur (2.9 m/s, ver Gráfica 4-10, pág. 89) .

## Escenarios del modelo

A continuación, se presentan las características de dos escenarios construidos a partir del modelo de la situación actual. En primer escenario surge como a partir de la propuesta descrita en el Capítulo 5 (pág. 95), donde se elimina la operación de UTP provenientes de CETRAM Universidad. En segundo escenario contienen todas las modificaciones del escenario 1, y además elimina los recorridos de UTP provenientes de CETRAM Taxqueña.

### *Escenario 1*

- Elimina el recorrido R2, correspondiente a las unidades pirata de la ruta 60 (R60P).
- Elimina el recorrido R3 correspondiente a las rutas R60, R76, R1.3, R111, y R40 que operan con camiones y tienen origen en CETRAM Universidad
- Elimina el recorrido R4, correspondiente a la ruta R76.1 que opera con vagonetas, tiene origen en CETRAM Universidad y entra al sistema por la calle Crepúsculo.
- El 72% del flujo de *Carros* a partir de la calle Crepúsculo cambia su punto de entrada a la calle Céfiro<sup>60</sup>.

---

<sup>60</sup> Esta modificación del modelo surge al considerar la propuesta del Capítulo 5 (pág. 95), donde los vehículos provenientes de Av. del Imán, en dirección hacia Av. Insurgentes quedan sin posibilidad de acceder al Blvd. Adolfo López Mateos por la Calle Crepúsculo y cuya única opción es a través de la calle Céfiro a partir del cruce C3. Por otro lado, los vehículos que transitan por Av. del Imán en dirección opuesta continúan con la misma posibilidad de acceder al Blvd. Por la calle Crepúsculo.

## Escenario II

- Considera todas las modificaciones del Escenario I.
- Elimina el recorrido R8, correspondiente a las rutas R1.T y R13.T, provenientes de CETRAM Taxqueña.

## Discusión de resultados

Considerando el modelo M4 de la situación actual y los dos escenarios previamente descritos, se presenta los resultados obtenidos en cada versión. Cabe mencionar que los resultados que se presentan corresponden a una única réplica del modelo. Sin embargo, los resultados obtenidos en réplicas diferentes son similares.

### ❖ Modelo M4 Situación actual

De la Figura 6-28 se observa que en toda la sección del Blvd. Adolfo López Mateos la velocidad promedio es menor que 2.9 m/s, ya que las secciones de calles han sido coloreadas con rojo. La Incorporación 5 del intercambiador vial y las calles Crepúsculo, Céfiro y una pequeña sección de Ocaso que se aproxima al Blvd. también presentan bajas velocidades.



Figura 6-28 Resultados del Modelo M4 en la situación actual  
Fuente: Elaboración propia (2020).



Por otro lado, en el paradero P5, de calle Céfiro, se aprecia gran acumulación de UTP, principalmente de rutas provenientes de CETRAM Universidad. Mientras que en P7 son pocas las UTP haciendo parada, no obstante, también existen *Carros* particulares estacionados. Observemos que el inicio del paradero Perisur es coloreado con rojo y el final de este con color amarillo y verde, esto indica que la velocidad promedio al salir del paradero incrementa hasta igualar o superar los 4.9 m/s.

En esta réplica, 1489 vehículos logran salir del sistema, pero de manera general la cantidad total de salidas es alrededor de 1500 vehículos, resultado que coincide con los datos de la primera gráfica, donde podemos observar que después del minuto 30 de la simulación, la cantidad de salidas se estabiliza alrededor de 25, de tal manera que en 60 minutos el promedio de salidas es de 1500 vehículos. El principal punto de salida es por el Blvd. Adolfo López mateos (63%), seguido por la desviación 5 (20%) y la calle Ocaso (9%).

❖ *Modelo M4, Escenario I*

En los resultados del escenario I (Figura 6-29) pueden apreciarse algunas secciones de Blvd. Adolfo López Mateos en colores distintos a rojo, lo que significa que la velocidad media aumentó en comparación con la situación actual. También se observa que en la calle Crepúsculo el flujo de *Carros* reduce considerablemente y solo una pequeña sección, próxima a la interacción con el Blvd. es coloreada en rojo. Sin embargo, las calles Ocaso y Duna muestran mayor afluencia de vehículos. En Céfiro, la velocidad media permanece por debajo de los 2.9 m/s pero es posible observar que la cantidad de *UTP* disminuyó y su ocupación es principalmente de *Carros*.



Figura 6-29 Resultados del modelo M4, Escenario I  
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el número de vehículos que logran salir del sistema es 1876, mayor que en la situación actual. De la Gráfica 1, de la Figura 6-30 se observa que el promedio de salidas por minuto se estabiliza aproximadamente a partir del minuto 20, cerca del valor 31, lo que sugiere que las salidas por hora es aproximadamente 1860, es decir, 360 vehículos más por hora, respecto a la situación actual. Los tres principales puntos de salida continúan siendo Blvd. Adolfo López Mateos, la desviación 5 y Ocaso, con porcentajes similares al del modelo de la situación actual.

❖ *Modelo M4, Escenario II*

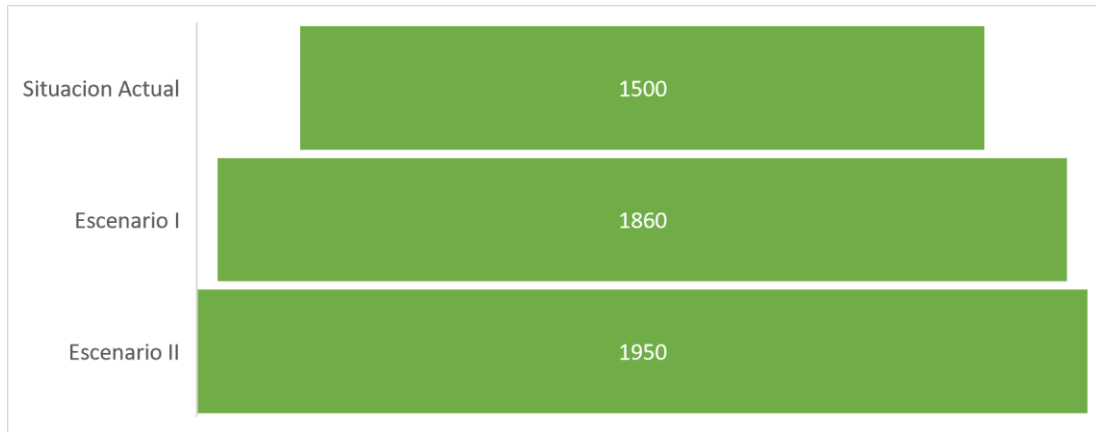
La coloración y distribución de vehículos al final de la simulación del escenario 2 es muy similar a los resultados del escenario I. Sin embargo, es posible notar pequeñas secciones de color amarillo en Blvd. Adolfo López Mateos y la calle Céforo (ver Figura 6-30), que en el escenario I fueron de color rojo. En este caso, los vehículos que lograron salir del sistema fueron 1954, con un promedio de 32.5 por minuto, como lo sugiere la Gráfica 1.



Figura 6-30 Resultados del modelo M4, Escenario II  
Fuente: Elaboración propia (2020)

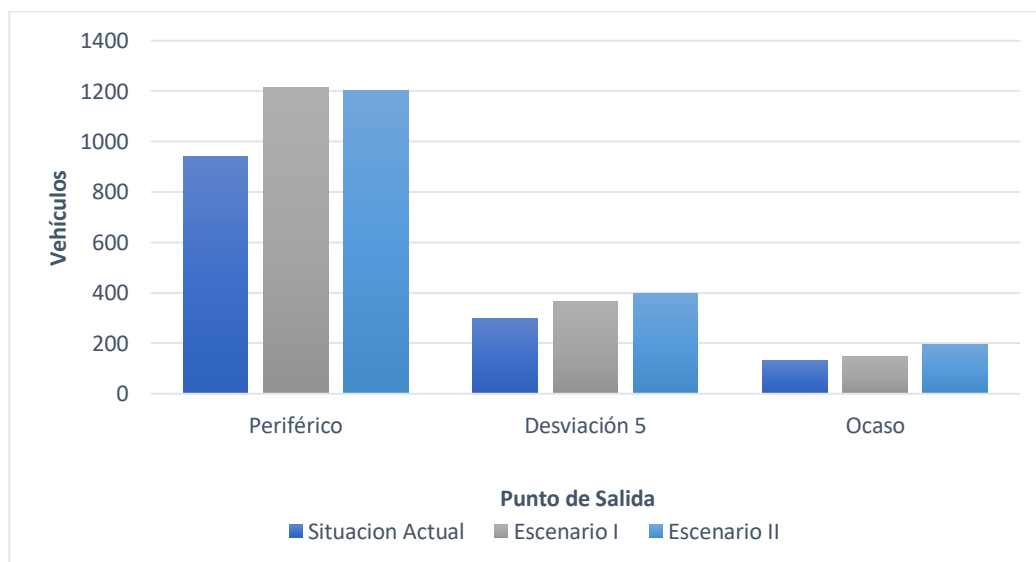
Posteriormente, a manera de resumen, la Gráfica 6-19 muestra la cantidad promedio de vehículos que salen del sistema en una hora. Notemos que al eliminar las rutas de transporte público esta cantidad incrementa. La mayor diferencia se encuentra entre la situación actual y el escenario I, donde se eliminaron las rutas provenientes de CETRAM Universidad, a excepción de la ruta R112. Sin embargo, la operación de esta ruta es poco significativa ya que el intervalo de salida de esta ruta está entre 20 y 30 minutos que implican 2 o 3 camiones por hora. Entre el Escenario I y II, la diferencia es menor, solo 90 vehículos por hora.





Gráfica 6-19 Cantidad promedio de vehículos que salen del sistema en una hora.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Por otro lado, en las tres versiones del modelo, los tres principales puntos de salida son Periférico, Desviación 5 y Ocaso. La cantidad de salidas por cada uno de estos puntos se incrementó de manera similar a las salidas totales del sistema. Sin embargo, de la Gráfica 6-19, podemos inferir que la diferencia de salidas por Periférico incrementa en mayor medida entre la versión de la situación actual y el Escenario I. De este resultado se concluye que la operación de UTP (provenientes de CETRAM Universidad) impactan significativamente en el tránsito vehicular sobre Blvd. Adolfo López Mateos. En cuanto a la variación de salidas en este punto, en los escenarios I y II, la variación fue pequeña, y probablemente se debe a que las rutas de Taxqueña, eliminadas en el Escenario II, no tienen la posibilidad de realizar paradas en el paradero Perisur.



Gráfica 6-20 Cantidad de vehículos que salen por Periférico, Desviación 5 y Ocaso en tres versiones del modelo M4  
Fuente: Elaboración propia (2020).

## 7 Conclusiones

### 7.1 Cumplimiento de objetivos

Después de presentar los resultados de los modelos de simulación, podemos concluir que todos los objetivos de este trabajo (Figura 7-1) se han alcanzado satisfactoriamente.

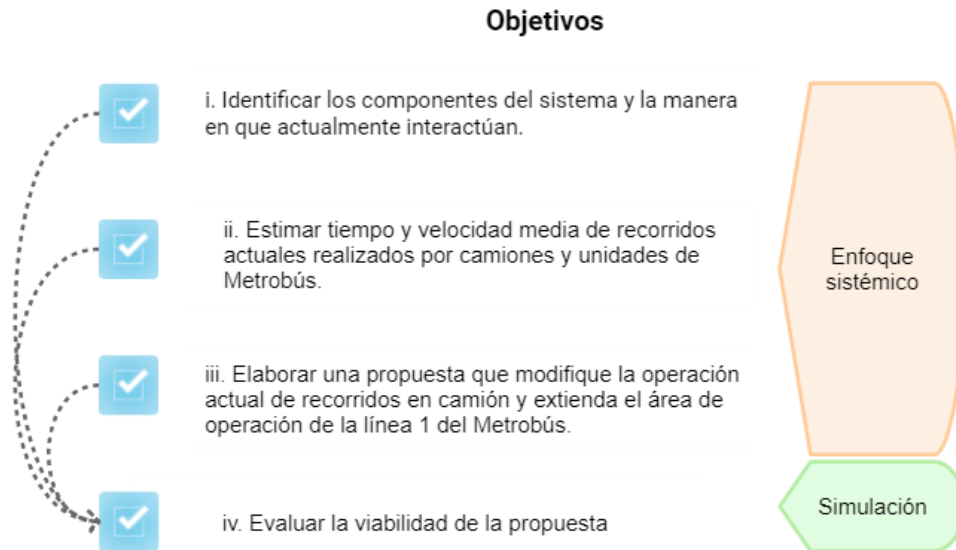


Figura 7-1 Elementos teóricos que apoyaron el alcance de objetivos  
Fuente: Elaboración propia (2020)

Los dos primeros objetivos se consiguieron en el capítulo 4 (pág. 42) como parte de la descripción de la región de estudio. Cabe mencionar que esta sección fue de suma importancia, ya que permitió conocer cuestiones de carácter cualitativo y cuantitativo. Dos aspectos clave para dicha descripción fueron:

- El enfoque sistémico y por síntesis para presentar los elementos del sistema, comenzando con la descripción global hasta puntualizar los detalles de los elementos más relevantes para este trabajo.
- La etapa de recolección de datos que proporcionó interacción directa con el sistema, favoreciendo el entendimiento de la operación de UTP y UMB dentro de la zona.

Por otro lado, la descripción de la región de estudio resultó indispensable para formular la propuesta del capítulo 5 (pág. 95), la cual fue estructurada al considerar la operación actual de UTP y la infraestructura existente de la zona. Asimismo, el capítulo 4, fue clave para estructurar el modelo conceptual y la lógica de los modelos de simulación.

Cabe señalar que la principal herramienta utilizada para alcanzar el objetivo **iv** fue la simulación. A través de cuatro modelos de diferentes tipos (de eventos discretos (M1), Monte Carlo (M2, M3) y de agentes(M4)), así como un modelo de programación lineal entera que fue utilizado para verificar los resultados del modelo

M3. La simulación resultó ser una herramienta de gran utilidad que permitió analizar la viabilidad de la propuesta en distintos aspectos. Los principales resultados de los cuatro modelos fueron:

- Estimación la demanda actual de pasajeros que realizan recorridos en UTP entre Perisur y CETRAM Universidad (Modelo M1)
- Estimación de la cantidad de UTP que en promedio operan por hora, entre Perisur y CETRAM Universidad (Modelo M1)
- Duración y velocidad de recorridos propuestos en UMB (Modelo M2)
- Estimación de la cantidad de UMB requeridas para satisfacer la demanda actual de pasajeros entre Perisur y CETRAM Universidad (Modelo M3)
- Estimación de la reducción de vehículos en circulación, al considerar la propuesta (Modelo M3)
- Visualizar la interacción de vehículos al considerar recorridos de UTP y al no considerarlos (Modelo M4)

Los modelos M1, M2 y M3 estudiaron el comportamiento exclusivo de UTP y UMB, ya que las variables de interés fueron, la demanda de usuarios, la cantidad de UTP en operación, y, la duración y velocidad de recorridos. Sin embargo, el modelo M4, además de considerar los recorridos de UTP, considera los recorridos de otros vehículos y analiza su interacción conjuntamente. Por esta razón, M4, se consideró un modelo sistémico más robusto, porque integra más elementos del sistema.

Un aspecto interesante para comentar es sobre los resultados de M3, que fueron contrastados con los de un programa lineal de variables enteras. De la discusión de estos modelos (sección 6.3, pág. 143), se concluye que la simulación, como una herramienta para la toma de decisiones ofrece mayor flexibilidad al presentar una gama de resultados posibles bajo un conjunto de parámetros de entrada. Mientras tanto, el modelo PLE se vuelve demasiado restrictivo cuando se utilizan parámetros fijos para algunas variables, y proporciona una única solución. En este trabajo se obtuvieron resultados similares en ambos modelos, al definir restricciones para algunas variables del modelo PLE, en lugar de considerarlas como parámetros fijos de entrada. Bajo estas circunstancias, los modelos de programación lineal resultan bastante útiles siempre que se conozcan o definan previamente de manera adecuada los límites que restringen el valor de las variables. Cabe señalar que en ocasiones la estructura de un programa lineal ya sea de variables enteras o reales, debe tener un carácter completamente restrictivo, pero todo depende de los objetivos que se desean cumplir con dicho modelo.

Basándonos en los resultados de los modelos, podemos concluir que la propuesta resulta atractiva al aumentar la conectividad entre los distintos modos de transporte de la CDMX (STC metro y Metrobús), con recorridos de poca duración, además del beneficio comunitario que se obtiene al dejar de considerar los recorridos de UTP que realizan paradas en puntos no establecidos.

Esta conclusión surge a partir de los modelos de simulación mientras que el sistema real permanece intacto. Es decir, la simulación es una herramienta que apoya la toma de decisiones y permite analizar situaciones hipotéticas sin realizar modificaciones innecesarias, altamente costosas, de larga duración o peligrosas en el sistema real.

## 7.2 Estudios prospectivos

A pesar de que la propuesta resulta favorable en cuestión de duración y velocidad de recorridos, se recomienda extender este estudio para evaluar aspectos desde otro punto de vista, o bien, cuestiones que surgen a partir de él. Estudios prospectivos pueden ocuparse de:

- Realizar un análisis de carácter económico que cuantifique los costos asociados a la implementación de la propuesta.
- Evaluar y cuantificar los beneficios e inconvenientes que los usuarios pueden tener al implementar la propuesta.
- Optimizar la duración de las fases de ciclos semafóricos de la propuesta, sincronizando los semáforos cercanos, no solo dentro de la región de estudio que corresponde a este estudio.
- Estructurar una propuesta para el uso de semáforos inteligentes en C5 (ver Figura 5-7, pág. 99), de manera que el flujo vehicular sobre Av. Insurgentes sea interrumpido únicamente cuando una UMB requiere incorporarse a Av. Del Imán. Esto podría evitar la acumulación de UMB en la estación Perisur.
- Analizar la atracción de viajes que esta propuesta puede generar y definir un factor de carga máxima  $\alpha$  adecuado.
- Analizar los recorridos propuestos de UMB, con un modelo sistémico de simulación basado en agentes (como en el modelo M4). Considerando una sección más amplia o toda de la región de estudio de este trabajo.
- Proponer nuevos programas de operación y zonas base para las rutas de CETRAM Universidad, de manera que sirvan como alimentadoras de la línea 1 del Metrobús en distintos puntos de Av. Insurgentes.
- Proponer modificaciones en los recorridos de las rutas de CETRAM Taxqueña, de manera que las UTP permitan mejorar el tránsito de vehículos en Av. Del Imán, cerca del cruce C5, donde actualmente realizan base (ver Figura 4-27, pág. 64)

### 7.3 Experiencia personal

La elaboración de este trabajo involucró el desarrollo de muchas habilidades, el uso y aprendizaje de nuevos conocimientos, metodologías y herramientas computacionales. Es por eso por lo que considero, un trabajo integro que me permitió crecer profesionalmente en diversos aspectos.

Uno de los retos que significó este trabajo fue hacer investigación de campo. Esto se convirtió en una experiencia profesional de suma importancia. Permite a un investigador conocer los objetos de estudio desde distintas perspectivas, apropiarse de la situación y, lo más importante, comprenderlo de mejor manera. Un entendimiento profundo y apropiado del sistema de estudio permite desarrollar e implementar ideas, propuestas y soluciones adecuadas.

Por otro lado, en cuanto a las herramientas y conceptos teóricos, con la elaboración de este trabajo logré profundizar conocimientos y comprender ampliamente todo aquello que involucra desarrollar un modelo de simulación, saber que existen distintos métodos y herramientas de implementación. Pero, además, logré aplicar dichos conocimientos en un caso de estudio, utilizando distintos métodos de implementación en los modelos de simulación.

Personalmente, estas experiencias se convirtieron en un desafío que me impulsaron a aprender nuevas cosas, aplicar de manera global todos aquellos conocimientos que he adquirido académicamente, desarrollar un pensamiento crítico y ser capaz de enfrentar problemas de esta naturaleza, así como proponer y evaluar posibles soluciones.

## Referencias y Bibliografía

- Ackoff, R. (1971). Towards a system of system concepts. *Management Science*, 17(11), 661-671.
- Ackoff, R. (1994). Systems thinking and thinking systems. *Systems dynamics Review*, 10, 175-188.
- Andrea, G. (2012). ¿Qué es la movilidad? Elementos para (re) construir las definiciones básicas del campo del transporte. *Bitácora Urbano Territorial*, vol.21, núm. 2, 61-74.
- Banks, J. (1998). *Handbook of simulation. Principles, methodology, advances, applications, and practice*. Atlanta, Georgia: John Wiley & Sons, Inc.
- Bertalanffy, L. (1976). *Teoría general de los sistemas. Fundamentos, desarrollo, aplicaciones*. México: Fondo de cultura Económica.
- Brailsford, S., Eldabi, T., Kunc, M., Mustafee, N., & Osorio, A. (2019). Hybrid simulation modelling in operational research: A state of the art review. *European Journal of Operational Research*, 721-737.
- Chen, G. (1975). What is the system approach. *Interfaces*, 6, 32-37.
- CONUEE. (2018). Movilidad Urbana Sostenible. *Comisión Nacional para el Uso de la Eficiente de la Energía*.
- Cruz, F. (2018). La movilidad urbana: dimensiones y desafíos. *EURE*, vol.44, núm 133,.
- Currie, C. S., & Cheng, R. C. (2016). A practical introduction to analysis of simulation output data. *Proceeding of the 2016 Winter Simulation Conference*, (págs. 118-132).
- CVMX. (2017). *CVMX comunidad vial*. Recuperado el 12 de 08 de 2019, de El movimiento. ¿Que es la movilidad?: <https://www.comunidadvialmx.org/articulos/2015-05-05-qu-es-movilidad>
- EOD. (2017). *Encuesta Origen Destino, en la Zona Metropolitana del Valle de México. Presentación de resultados por INEGI*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Farnum, N., & Stanton, L. (marzo de 1987). Some result concerning the estimation of Beta distribution parameters in PERT. *The Journal of the Operational Research Society*, 3(3), 287-290. Obtenido de <https://www.jstor.org/stable/2581949>
- Ferrocarriles Suburbanos. (2019). *fsuburbanos*. Recuperado el 07 de junio de 2019, de Ferrocarriles Suburbanos: <http://fsuburbanos.com/secciones/operacion/horarios.php>
- GEOTAB. (2020). *Geotab*. Recuperado el 28 de enero de 2020, de ¿Qué es la movilidad inteligente?: <https://www.geotab.com/es/movilidad-inteligente/>
- Grigoryev, I. (2015). *Anylogic 7 in three days. A quick course in simulation modeling*.
- Herrerías, R., Palacios, f., & Herrerías, J. (s.f.). Relaciones entre las familias de distribuciones Beta de varianza constante, mesocurticas, de tipo caballer y  $pq=p+q+1$ .
- Hillier, F. S., Hillier, M. S., & Lieberman, G. J. (2000). *Metodos cuantitativos para administración*. McGraw-Hill.
- INEGI. (2015). *Encuesta Intersensal 2015*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de la Ciudad de México 2017*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI\_a. (2017). *inegi*. Recuperado el 26 de mayo de 2019, de Programas del Instituto de estadística y Geografía.
- Islas, V., & Lelis, M. (2007). Análisis de los sistemas de transporte. Vol.1: Conceptos Básicos.
- Kelton, D. W. (2000). Experimental design for simulation. *Proceeding of the 2000 Winter Simulation Conference*, (págs. 32-38).
- Krishnamoorthy, K. (2006). *Handbook of Statistical Distributions with Applications*. Boca Raton: Chapman & Hall/ CRC Tayloy & Francis Group.
- Law, A. c. (2015). Statistical analisis of simulation output data: the practical state of the art. *Proceeding of the 2015 Winter simulation Conference*, (págs. 1810-1819).
- Law, A. d. (2017). A tutorial on design of experiments for simulation modeling. *Preceeding of the Winter simulation Conference*, (págs. 550-564).
- Law, A. M. (2015). *Simulation modeling and analysis. Fifth Edition*. New York, USA: McGraw Hill Education.
- Law, A. M. (2016). A tutorial on how to select simulation input probability distributions. *Proceeding of the 2016 Winter Simulation Conference*, 103-117.
- Llanes, J. (2014). *Estimación del flujo de saturación en intersecciones semaforizadas seleccionadas de la Ciudad de México*. Tesis. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- McCarthy, N. (05 de junio de 2019). *Forbes*. Recuperado el 27 de enero de 2020, de The World's Worst Cities For Traffic Congestion [Infographic]: <https://www.forbes.com/sites/niallmccarthy/2019/06/05/the-worlds-worst-cities-for-traffic-congestion-infographic/#6c15a33712bc>
- Méndez, V. (2019). *Tesis : Propuesta para optimizar el inventario y la entrega de medicamentos en una institución de salud pública*. México: UNAM - Dirección General de Bibliotecas. Tesis digitales.
- Metrobús CDMX. (2020). *Gobierno de la Ciudad de México*. Recuperado el 20 de abril de 2020, de Metrobús. Fichas Técnicas.: <https://www.metrobus.cdmx.gob.mx/dependencia/acerca-de/fichas-tecnicas>
- Metrobús. CDMX. (2019). *Fichas técnicas del Metrobús*. Recuperado el septiembre de 2019, de sistemas de Corredores de Transporte Público de Pasajeros del D.F. Metrobús.: <http://data.metrobus.cdmx.gob.mx/fichas.html#uno>
- Mexibús. (2016). *transmasivo*. Recuperado el 07 de junio de 2019, de Transmasivo, Mexibús: <http://www.transmasivo.com.mx/index.html>
- México. (2018). *Secretaría de Movilidad*. Obtenido de Gobierno del estado de México: [https://smovilidad.edomex.gob.mx/transporte\\_publico](https://smovilidad.edomex.gob.mx/transporte_publico)
- México\_a. (2018). *Gobierno de la Ciudad de México (2018-2024)*. Recuperado el 10 de marzo de 2020, de Sistema de Transporte Colectivo: <https://www.metro.cdmx.gob.mx/>.

- México\_b. (2018). *Gobierno de la Ciudad de México (2018,2024)*. Recuperado el 09 de marzo de 2020, de Sistema de Transporte Eléctrico: <https://www.ste.cdmx.gob.mx/>
- México\_c. (2018). *Gobierno de la Ciudad de México (2018-2024)*. Recuperado el 06 de junio de 2019, de Red de Transporte Público: <https://www.rtp.cdmx.gob.mx/>
- México\_d. (2018). *Gobierno de la Ciudad de México (2018-2024)*. Recuperado el 06 de junio de 2019, de Metrobús: <https://www.metrobus.cdmx.gob.mx/>
- México\_e. (2018). *Gobierno de la Ciudad de México (2018-2024)*. Recuperado el junio de 07 de 2019, de Rutas y corredores del transporte publico consecionado: <https://datos.cdmx.gob.mx/explore/dataset/rutas-y-corredores-del-transporte-publico-concesionado/information/?location=11,19.41933,-99.08226>
- Mexico\_g. (2018). *Gobierno de la ciudad de México (2018-2024)*. Recuperado el 10 de marzo de 2020, de ECOBICI: <https://www.ecobici.cdmx.gob.mx/>
- Microsoft. (2020). *Microsoft*. Obtenido de Microsoft.com: <https://www.microsoft.com/es-mx/>
- Monroy, G. S., & Jimenez, J. (2008). Historia del desarrollo de sistemas en México. *conferencia Presentada en la tercera Reunión Regional de Pesnamiento y Prácticas de Sistemas en el Complejo Ambinete Global y Latinoamericano*.
- Moreno, E., & Nieves, V. (2019). *Modelos de probabilidad en transporte e ingeniería. Usos comunes y ajuste de datos*. Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro.
- Mun , J. (2006). Appendix-Understanding Probability Distributions. En J. Mun, *Modeling Risk* (págs. 116,117). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Oda, B. (2013). *Introduccion al analisis gráfico de daos experimentales*. México: UNAM, Facultad de Ciencias.
- Python Software Foundation. (2020). *Python*. Obtenido de Python.org: <https://www.python.org/>
- Ramírez, B. R. (2009). Alcances y dimensiones de la movilidad: Aclarando conceptos. *Ciudades, núm. 82*.
- Redacción AN/ES. (14 de enero de 2020). *Aristegui Noticias*. Recuperado el 10 de marzo de 2020, de Inician obra del Cablebús Línea 2; consta de 7 estaciones: <https://aristeguinoicias.com/1401/mexico/inician-obra-del-cablebus-linea-2-consta-de-7-estaciones/>
- Robinson , S. (2017). A tutorial on simulation conceptual modeling. *Proceeding of the 2017 Wninter simulation Conference*, (págs. 565-579).
- Robinson, S. a. (2014). *Simulation. The practice of model development and use*. Palgrave Macmillan.
- Rubinstein, R., & Kroese, D. (2017). *Simulation and the Monte Carlo Method*. Hoboken, New Yersey: John Wiley & Sons.
- Sameera, A., Georgios, K., Pierre, L., & Gregory, M. O. (2017). Agent Based Moddeling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review 24*, 13-33.



- Sampieri, R., Fernández, C., & Bautista, P. (2010). *Metodología de la investigación. Quinta edición*. México D.F: McGraw Hill.
- Sargent, R. (2015). An introductory tutorial on verification and validation of simulation models. *Proceeding of the 2015 Winter Simulation Conference*, (págs. 1729-1740). Syracuse, NY, USA.
- Secretaría de Economía. (2017). *Secretaría de Economía*. Recuperado el 29 de mayo de 2019, de Información Económica y Estatal : Ciudad de México:  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/194616/ciudad\\_de\\_mexico\\_2017\\_02.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/194616/ciudad_de_mexico_2017_02.pdf)
- SEMOVI. (2019). *semovi.cdmx*. Recuperado el 26 de mayo de 2019, de Acerca de SEMOVI:  
<http://data.semovi.cdmx.gob.mx/wb/stv/estructura.html>
- Semovi\_a. (24 de abril de 2018). *Gobierno de la ciudad de México*. Recuperado el 26 de marzo de 2020, de SEMOVI- Taxis. Tarjeta informativa:  
<http://www.comunicacion.cdmx.gob.mx/noticias/nota/semovi-taxi>
- Semovi\_b. (2019). *Plan estratégico de movilidad de la Ciudad de México 2019. Una ciudad, un sistema*. Semovi, Gobierno de la ciudad de México. Recuperado el marzo de 2020, de  
<https://semovi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/plan-estrategico-de-movilidad-2019.pdf>
- The Anylogic Copany. (2020). *Anylogic*. Obtenido de Anylogic.com: <https://www.anylogic.com/>
- UNAM. (2020). *Portal de estadística Universitaria*, Última actualización en marzo 17, 2020. Recuperado el 18 de marzo de 2020, de Universidad Nacional Autónoma de México:  
<http://www.estadistica.unam.mx/numeralia/>
- UVP. (2012). *Universidad Politécnica de Valencia*. Recuperado el 12 de 08 de 2019, de Movilidad y Transporte: <http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/820042normalc.html>
- Vuchic, V. (2005). Transit Operations and Service Scheduling. En V. R. Vuchic, *Urban Transit: Operations, Planning, and Economics*. (págs. 7-11).
- White, K., & Ingalls, R. (2017). The basics of simulation. *Proceeding of the 2017 Winter Simulation Conference*, 505-519.

## APENDICES

### APENDICE A: AJUSTE DE DATOS

Los datos corresponden a seis rutas de transporte público que realizan parada en P5<sup>61</sup>. Cuatro de las rutas tienen estación terminal en CETRAM Universidad (C.U.) y dos al CETRAM Taxqueña (C.T.). Los datos fueron obtenidos de lunes a viernes entre las 7:00 y 10:00 horas. El periodo de la recolección de datos corresponde a los meses de septiembre, octubre y noviembre de 2019. A continuación, se presenta el ajuste de los datos correspondientes al tiempo de parada y posteriormente un ajuste de la cantidad de pasajeros que suben y bajan en P5.

#### Ajuste de los tiempos de parada

Se requiere identificar una distribución de probabilidad representativa de los datos. En la Tabla 0-1 se presentan 80 registros, correspondientes a los tiempos de parada. Las estadísticas básicas del conjunto de datos se presentan en seguida.

**Tiempo de parada de las unidades de transporte público (segundos)**

3.49	4.11	4.32	4.34	4.37	4.41	4.5	4.7	5.15	5.19
5.33	5.39	5.5	6.05	6.1	6.2	6.36	6.66	6.75	7.2
7.24	7.75	7.8	7.82	7.91	8.29	8.4	8.42	9.17	9.28
10.33	10.82	10.89	11.05	11.36	11.68	11.75	11.82	11.86	12.95
13	13.03	13.41	13.43	13.58	13.77	15.2	15.22	15.75	16.51
16.54	16.77	16.86	17.22	17.29	17.37	17.38	17.54	17.71	18.61
18.94	19.19	19.23	19.23	19.56	20.09	20.28	20.29	21.35	23.53
23.98	23.98	24.54	24.68	26.68	27.66	35.05	37.5	44.66	47.3

*Tabla 0-1 Tiempos de parada de unidades de transporte público (segundos).*

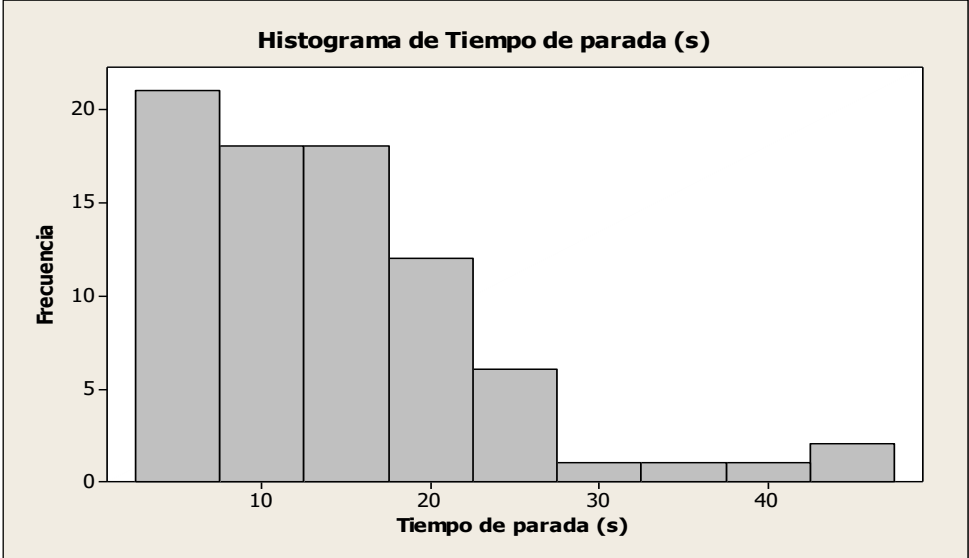
*Fuente: Elaboración propia (2020).*

#### Estadísticas Descriptivas de los datos

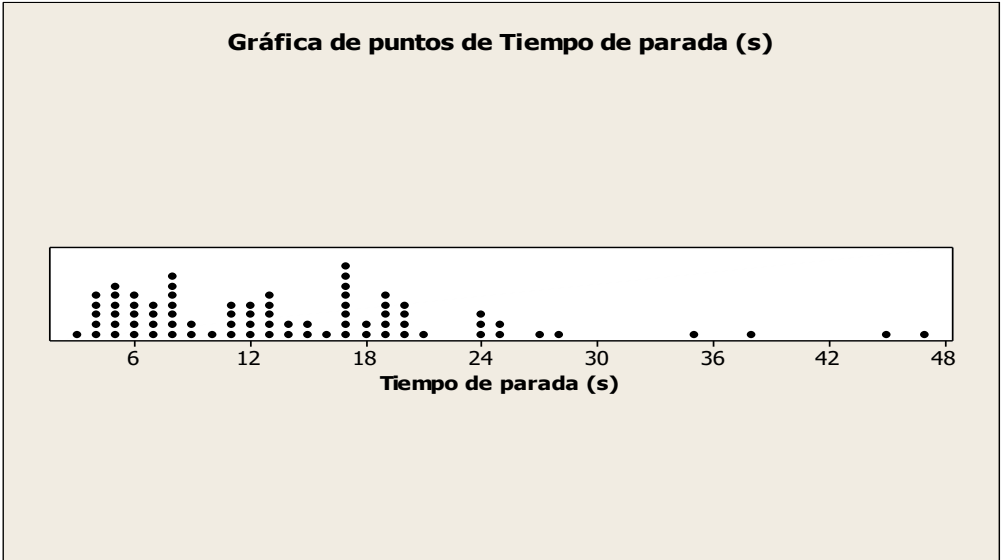
<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desv.Est.</b>	<b>Mediana</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Asimetría</b>	<b>Kurtosis</b>
80	14.2077	8.91601	12.975	3.49	47.3	1.47195	2.95293

<sup>61</sup> P5 es la nomenclatura utilizada para la parada de unidades de transporte público al final de la calle Céfiro, Colonia Ajusco, Del. Coyoacán, CDMX

Un primer análisis de los datos se obtiene del histograma y la gráfica de puntos, donde es posible apreciar que los datos están sesgados a la izquierda, la mayoría se ubican entre 0 y 25 ( Gráfica 0-1, Gráfica 0-2). A diferencia del histograma, la gráfica de puntos ilustra de manera desagregada la posición de cada dato, por ejemplo, en el histograma los últimos cuatro datos son representados en dos barras de frecuencia 1 y 2 respectivamente, mientras que en la gráfica de puntos la distribución de estos puntos se aprecia como dos conjuntos de dos datos, alrededor del valor 36 y antes del valor 48.

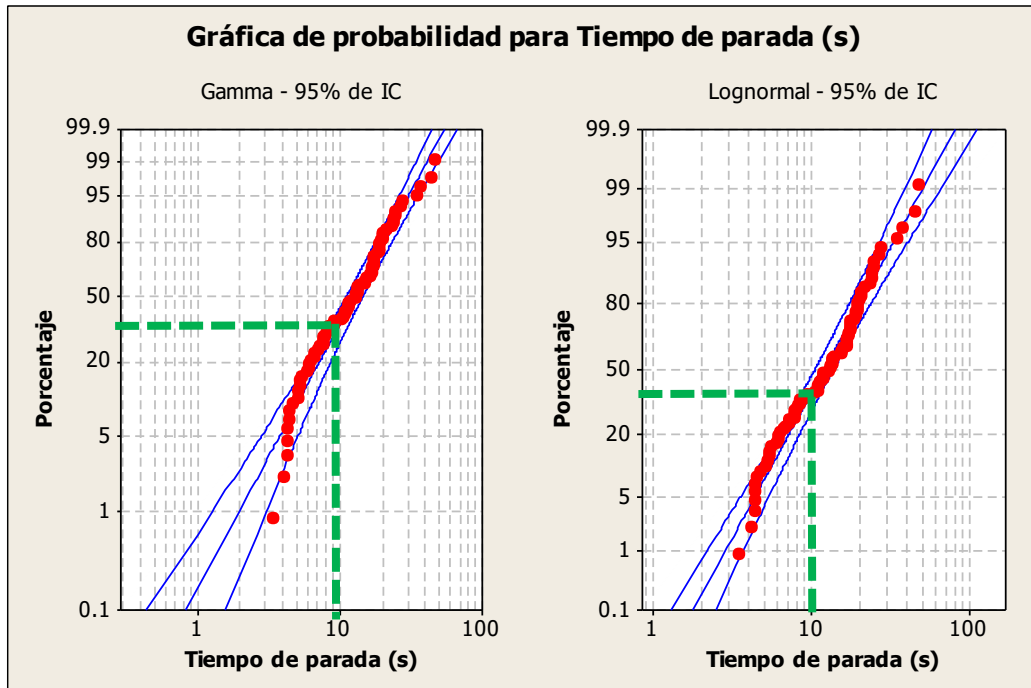


Gráfica 0-1 Histograma de los tiempos de parada de las unidades de transporte público en P5 (segundos)  
Fuente: Elaboración propia (2020).



Gráfica 0-2 Gráfica de puntos de los tiempos de parada de las unidades de transporte público en P5 (segundos)  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Para determinar la distribución adecuada se utilizaron las herramientas de ajuste de MINITB, que gráficamente sugieren distribuciones como la Gamma y Lognormal.



Gráfica 0-1. Gráfica de probabilidad Gamma y Lognormal para el tiempo de parada (s).  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Las gráficas anteriores muestran cada valor de un dato versus el porcentaje de valores en la muestra que son menores o igual a este valor. En cada una, existe una línea intermedia que representa el percentil esperado de la distribución, y dos líneas de borde que delimitan el intervalo de confianza de los percentiles. Por ejemplo: En ambas distribuciones, aproximadamente el 40% de los valores son menores o igual a 10.

Posteriormente, se formulan dos hipótesis:

**H0:** Los datos del tiempo de parada (s) de unidades de transporte público siguen una distribución Gamma.

**H1:** Los datos del tiempo de parada (s) de unidades de transporte público siguen una distribución Lognormal.

Al evaluar los datos con estas dos distribuciones y utilizando un nivel de significancia  $\alpha=0.05$  , en MINITAB se obtiene los siguientes resultados.

<b>Prueba de bondad de ajuste</b>			
<i>Distribución</i>	<i>AD</i>	<i>P</i>	
Gamma	0.608	0.129	
Lognormal	0.707	0.063	

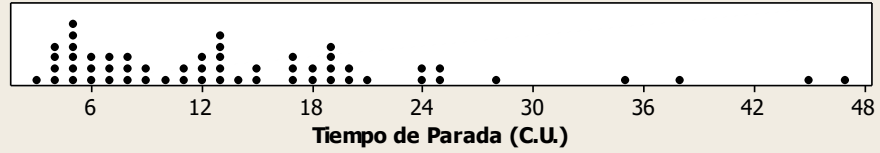
<b>Estimaciones ML de los parámetros de distribución</b>			
<i>Distribución</i>	<i>Ubicación</i>	<i>Forma</i>	<i>Escala</i>
Gamma		2.89610	4.90582
Lognormal*	2.47132		0.61644

*Tabla 0-1 Resultados de la prueba de bondad de ajuste para tiempos de parada.  
Fuente: Elaboración propia (2020).*

De acuerdo con el p-valor obtenido, ambas hipótesis pueden ser aceptadas, ya que para ambas distribuciones el p-valor obtenido es mayor que  $\alpha=0.05$ . Sin embargo, la diferencia entre el valor  $\alpha$  y el p-valor correspondiente a la distribución Gamma es mayor, por lo que puede sugerirse considerar que la muestra de datos sigue esta distribución.

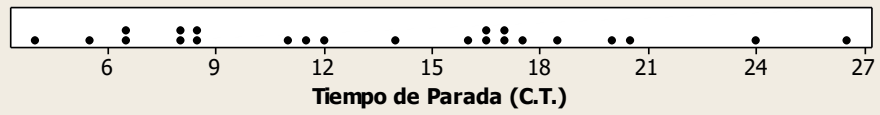
Continuando con el análisis, evaluaremos el conjunto de datos, pero ahora separando entre las unidades de transporte con terminal en C.U. y las de C.T. De las gráficas de puntos podemos observar que el sesgo en los datos de C.U. es mayor que en los datos de C.T., de hecho, el sesgo de los datos correspondientes a C.T. es mucho menor que podrían considerarse distribuciones de probabilidad simétricas.

### Gráfica de puntos de Tiempo de Parada (C.U.)



Gráfica 0-2 Gráfica de puntos de tiempo de parada (C.U.)  
Fuente: Elaboración propia (2020).

### Gráfica de puntos de Tiempo de Parada (C.T.)



Gráfica 0-3 Gráfica de puntos del tiempo de parada de unidades de transporte público (C.T.) en P5  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Haciendo un análisis similar de los datos conjuntos y considerando las distribuciones mas comunes, se obtienen los siguientes resultados:

<b>Resultados para Tiempo de Parada (C.T.)</b>							
<b>Estadísticas descriptivas</b>							
<i>N</i>	<i>Media</i>	<i>Desv.Est.</i>	<i>Mediana</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Asimetría</i>	<i>Kurtosis</i>
23	13.5983	6.18719	13.77	4.11	26.68	0.305049	-0.718441
<b>Prueba de bondad del ajuste</b>							
Distribución	AD	P-valor					
Normal	0.397	0.341					
Lognormal	0.501	0.187					
Exponencial	3.137	<0.003					
Weibull	0.366	>0.250					
Gamma	0.438	>0.250					
Logística	0.458	0.210					
Loglogística	0.547	0.111					
<b>Estimaciones ML de los parámetros de distribución</b>							
Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral			
Normal*	13.59826		6.18719				
Transformación de Box-Cox*	3.58978		0.86262				
Lognormal*	2.49702		0.50730				
Lognormal de 3 parámetros	3.12537		0.26116	-9.94864			
Exponencial			13.59826				
Exponencial de 2 parámetros			9.91951	3.67872			
Weibull		2.43978	15.38444				
Weibull de 3 parámetros		1.72774	11.62230	3.21392			
Valor extremo más pequeño	16.69191		6.04852				
Valor extremo más grande	10.66486		5.17277				
Gamma		4.58782	2.96399				
Gamma de 3 parámetros		17.97493	1.42879	-12.09578			
Logística	13.44122		3.62027				
Loglogística	2.52755		0.29619				
Loglogística de 3 parámetros	3.06736		0.16865	-8.56862			

Tabla 0-2 Resultados de la prueba de bondad de ajuste para tiempos de parada C.T.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

## Resultados para Tiempo de Parada (C.U.)

### Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Kurtosis
57	14.4537	9.84337	12.95	3.49	47.3	1.48342	2.47742

### Prueba de bondad del ajuste

Distribución	AD	P-valor
Normal	1.941	<0.005
Lognormal	0.515	0.184
Exponencial	3.789	<0.003
Weibull	0.693	0.069
Gamma	0.554	0.179
Logística	1.225	<0.005
Loglogística	0.619	0.070

### Estimaciones ML de los parámetros de distribución

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	14.45368		9.84337	
Lognormal*	2.46095		0.65923	
Exponencial			14.45368	
Weibull		1.60392	16.24643	
Gamma		2.53519	5.70121	
Logística	13.21298		5.12330	
Loglogística	2.46584		0.38875	

\* Escala: Estimación de ML ajustado

Tabla 0-3 Resultados de la prueba de bondad de ajuste para tiempos de parada C.U.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Con el mismo nivel de significancia  $\alpha=0.05$ , y nuevamente considerando el p-valor más distante al nivel de significancia se concluye lo siguiente:

- Los tiempos de paradas de unidades de transporte con terminal en C.U. siguen una distribución Lognormal con los siguientes parámetros: Ubicación=2.46; Escala=0.659.
- Los tiempos de paradas de unidades de transporte con terminal en C.T. siguen una distribución Normal  $N(13.59, 6.187)$ .

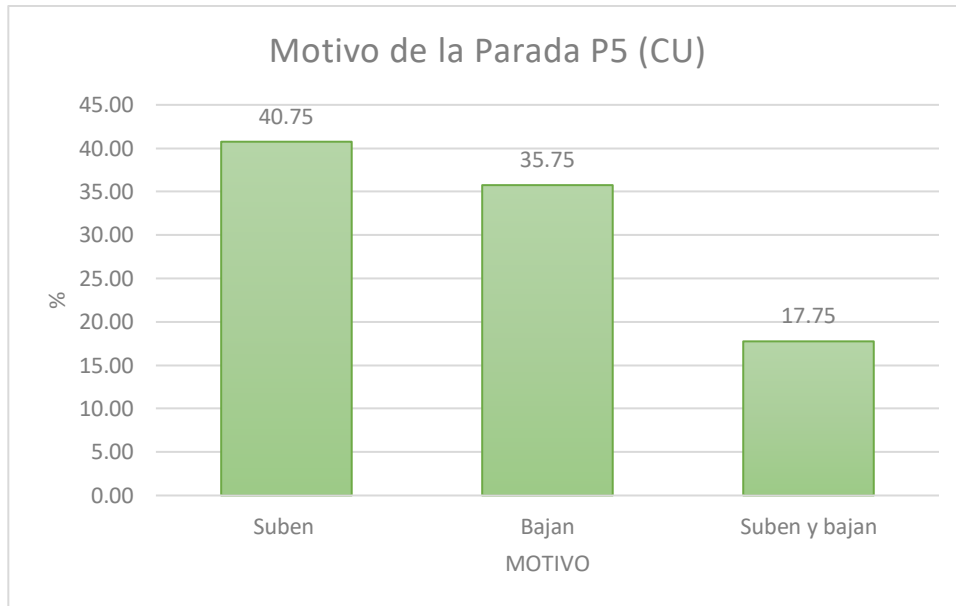
Notemos que las distribuciones obtenidas al separar los datos no coinciden con la distribución Gamma correspondiente al conjunto total de los datos por lo que se cree pertinente realizar la separación por CETRAM, ya que en este caso en particular los datos mostraron mayor sesgo para C.U. que para C.T.

### Utilización de la parada

Se analizará la parada P5 de C.U. con el objetivo de definir el motivo de la parada, es decir, si la parada es utilizada para que los pasajeros suban o bajen de la unidad de transporte público, o para ambos casos.



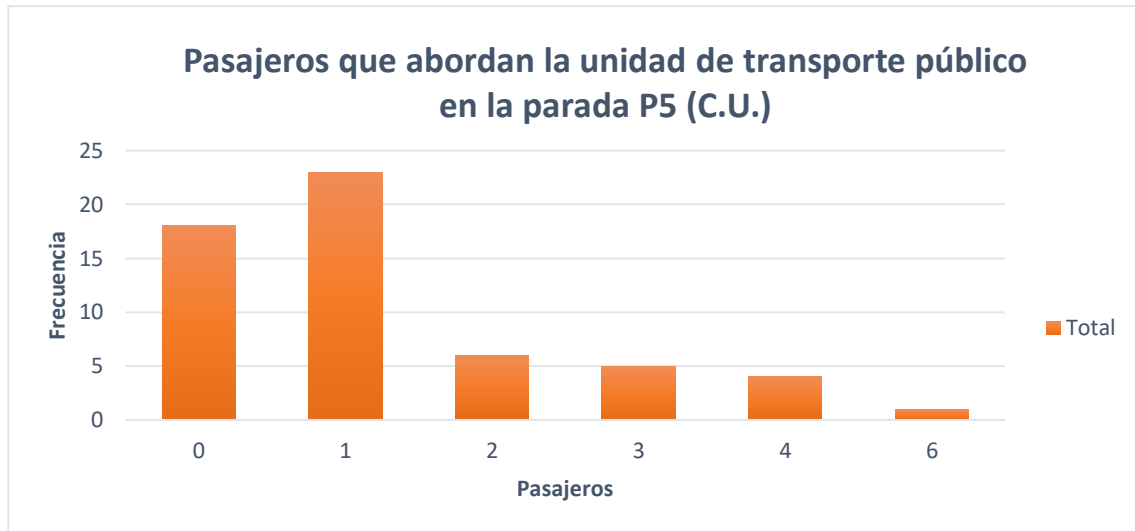
De 57 registros, se encontró que: 39 indican que la parada fue utilizada para abordar la unidad, 34, para descender de la unidad y en 16, ambos movimientos. Estos resultados se muestran en la Gráfica 0-4, donde podemos visualizar que el principal motivo de la parada es abordar la unidad, y el 17.75% de las veces, la parada es para abordar y descender.



Gráfica 0-4 Motivo de la parada P5 (C.U.)  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Posteriormente, para analizar la cantidad de personas que suben y bajan de cada unidad, se realizó un procedimiento similar al del tiempo de parada, considerando únicamente distribuciones discretas, ya que el conjunto de datos toma valores únicamente enteros.

La Gráfica 0-5 muestra la frecuencia observada del número de pasajeros que abordan las unidades de transporte público en la parada P5. Es posible apreciar asimetría positiva en la gráfica. Cabe mencionar que se consideran las 57 observaciones, lo que da lugar a considerar las ocasiones en que ninguna persona aborda la unidad.



Gráfica 0-5 Pasajeros que abordan la unidad de transporte público en la parada P5.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Para el caso de los pasajeros que abordan se tiene la siguiente hipótesis.

**H0:** El número de pasajeros que abordan en la parada P5 (CU), sigue una distribución Poisson de media=1.26.

Utilizando las herramientas de MINITAB se obtiene el reporte de la Tabla 0-4.

Prueba de bondad de ajuste para distribución de Poisson				
Media de Poisson para Pasajeros que suben en P5 CU = 1.26316				
Pasajeros que suben en P5 CU	Observado	Probabilidad de Poisson	Esperado	Contribución a Chi-cuad.
0	18	0.282760	16.1173	0.21992
1	23	0.357170	20.3587	0.34268
2	6	0.225581	12.8581	3.65791
3	5	0.094982	5.4139	0.03165
>=4	5	0.039508	2.2519	3.35353
N	N*	GL	Chi-cuad.	Valor P
57	0	3	7.60569	0.055

Tabla 0-4 Resultados de la prueba de bondad de ajuste para la distribución Poisson.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Dado que el p-valor obtenido es mayor que 0.05, H0 no se puede rechazar y se considera que el número de pasajeros que abordan en la parada P5 (CU) sigue una distribución Poisson de media 1.26.

Para el caso de los pasajeros que bajan de la unidad, se realizó un análisis similar. Sin embargo, ninguna distribución discreta representa de manera adecuada este conjunto de datos. La distribución que se asigna al número de pasajeros que abordan en la parada P5 (CU) se define por medio una tabla a través de los siguientes pasos:

1. Se define la frecuencia de pasajeros observada, considerando valores enteros no negativos, como lo indica la Tabla 0-5 cuya representación se ilustra en la Gráfica 0-6.

### Pasajeros que bajan de una unidad de transporte público en la parada P5 (CU)

Pasajeros	Frecuencia Relativa	Frecuencia absoluta	Probabilidad	Probabilidad Acumulada
0	23	40.35	0.4035	0.404
1	10	17.54	0.1754	0.579
2	5	8.77	0.0877	0.667
3	12	21.05	0.2105	0.877
4	2	3.51	0.0351	0.912
5	1	1.75	0.0175	0.930
6	2	3.51	0.0351	0.965
12	1	1.75	0.0175	0.982
13	1	1.75	0.0175	1.000
Total=	57	100	1	

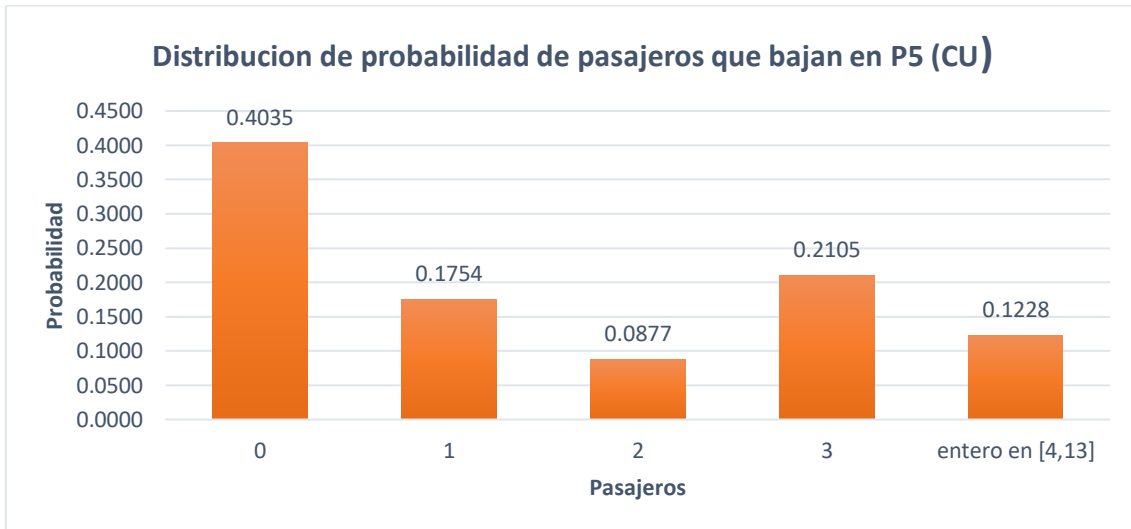
Tabla 0-5 Pasajeros que bajan de la unidad de transporte público en la parada P5 (C.U.)  
Fuente: Elaboración propia (2020).

2. Se obtiene la frecuencia absoluta y ésta es considerada como la probabilidad de que cierto número de pasajeros desciendan de la unidad. Por ejemplo, la probabilidad de que 1 persona baje en la parada P5 es 0.175, mientras que la probabilidad de que bajen 6 personas es tan solo 0.035.



Gráfica 0-6 Distribución de los pasajeros que bajan en P5 (C.U.). Valores individuales.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

3. De la Gráfica 0-6, observemos que la cantidad máxima de pasajeros que descienden es 13. Dado que los valores  $y$  tales que  $4 \leq y \leq 13$  tienen frecuencia 1 o 2, de manera casi uniforme, podemos suponer que cualquier valor entero  $x \in [4,13]$  puede ocurrir con la misma probabilidad. Bajo este supuesto, la representación adecuada de los datos está dada en la Gráfica 0-7.



Gráfica 0-7 Distribución de pasajeros que bajan en P5 (C.U.). Valores agrupados.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

4. La distribución de la probabilidad que se ilustra en la Gráfica 0-7 se representa mediante la Tabla 0-6.

**Distribución de probabilidad de pasajeros que bajan en P5 (CU)**

Valor	Probabilidad
0	0.4035
1	0.1754
2	0.0877
3	0.2105
entero en [4,13]	0.1228

Tabla 0-6 Distribución de pasajeros que bajan en P5 (C.U.)  
Fuente: Elaboración propia (2020).

Otra manera de escribir tal distribución es por medio de un vector  $D$ :

$$D = (0, 0.4035; 1, 0.1754; 2, 0.0877; 3, 0.2105, [4,13], 0.1228)$$

Donde las entradas impares denotan el valor o rango de valores y las entradas pares denotan la probabilidad correspondiente a cada valor/rango.

## APENDICE B: DISTRIBUCIÓN BETA

Este apéndice consta de dos partes; la primera, “Elementos teóricos”, describe las características generales de la distribución Beta. Posteriormente, la segunda parte consta de un ejemplo de aplicación.

### Elementos teóricos

La distribución beta es ampliamente utilizada, especialmente cuando se requiere una distribución sobre un intervalo bien definido  $[A, B]$ . Es utilizada para representar la incertidumbre en la probabilidad de ocurrencia de un evento, así como describir datos empíricos y predecir comportamientos aleatorios de porcentajes y fracciones (Mun, 2006). Su extenso uso se debe a la gran variedad de formas que puede adoptar de acuerdo con los valores de sus parámetros de forma,  $\alpha$  y  $\beta$  (Krishnamoorthy, 2006):

- Forma de U para  $\alpha < 1$  y  $\beta < 1$
- Simétrica para  $\alpha = \beta > 1$
- Forma de J para  $(\alpha - 1)(\beta - 1) < 0$
- Parabólica unimodal para otros valores de para  $\alpha$  y  $\beta$

Para valores significativamente similares de  $\alpha$  y  $\beta$  la probabilidad acumulada de la distribución beta puede ser aproximada por la distribución normal (Krishnamoorthy, 2006). Cuando  $\alpha < \beta$  la distribución es sesgada positivamente (la mayoría de los valores son cercanos al valor mínimo), y cuando  $\alpha > \beta$  la distribución es sesgada a la izquierda (la mayoría de los valores están cercanos al valor máximo, Figura 0-1). Un caso particular de la distribución beta es la distribución triangular, en la cual el valor modal es igual a uno de los extremos del rango donde está definida la función (Krishnamoorthy, 2006).

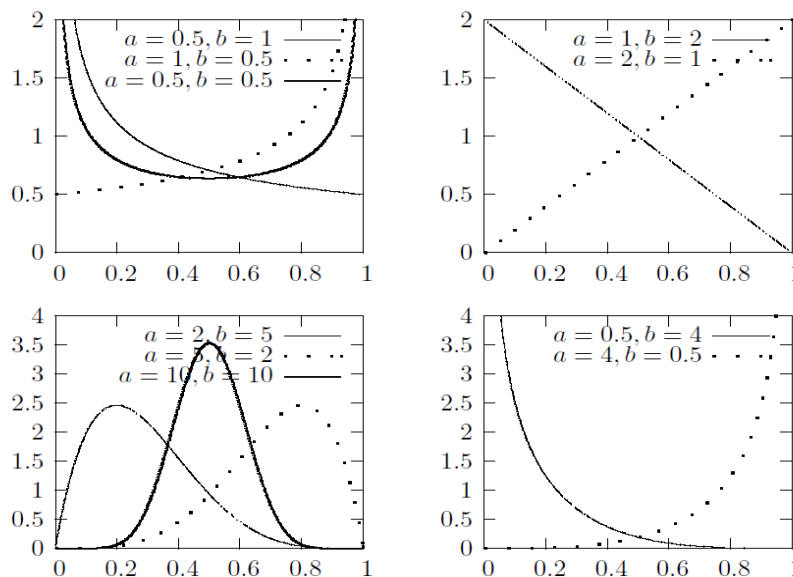


Figura 0-1 Ejemplos de la pdf de la distribución Beta.  
Tomado de (Krishnamoorthy, 2006)

La función de densidad de la distribución beta tiene una forma estándar

$$f_x(x, \alpha, \beta) = \frac{x^{(\alpha-1)}(1-x)^{(\beta-1)}}{B(\alpha, \beta)} \quad \text{para } 0 < x < 1 \text{ y } \alpha, \beta > 0 \quad (10)$$

Donde  $B(\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha+\beta)}$  es la función Beta. La media y varianza de la distribución beta están definidos por

$$\mu_x = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \quad (11)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)} \quad (12)$$

La forma estándar se puede generalizar trasladando el intervalo (0,1) al intervalo (A,B) por medio de la transformación lineal generada a partir de la siguiente igualdad

$$x = \frac{y - A}{B - A} \quad (13)$$

Una vez que la transformación se ha aplicado, la expresión para la función de densidad, la media, y la varianza de la distribución beta son las siguientes (Farnum & Stanton, 1987):

$$f_y(y, \alpha, \beta, A, B) = \frac{(x - A)^{(\alpha-1)}(B - x)^{(\beta-1)}}{B(\alpha, \beta) * (B - A)^{\alpha+\beta-1}} \quad \text{para } A < y < B \text{ y } \alpha, \beta > 0 \quad (14)$$

$$\mu_y = A + (B - A)\mu_x = A + (B - A)\frac{\alpha}{\alpha + \beta} \quad (15)$$

$$\sigma_y^2 = (B - A)^2\sigma_x^2 = \frac{(B - A)^2\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)} \quad (16)$$

Una de las principales aplicaciones de la distribución beta es en el método PERT (Project Evaluation and Review Techniques) para estimar el tiempo de duración de actividades considerando únicamente 3 parámetros:

- La estimación **optimista (o)**, bajo las condiciones más favorables
- La estimación **pesimista (p)**, bajo las condiciones menos favorables, y
- La estimación **más probable (m)**

a partir de los cuales es posible obtener una estimación de la media y desviación estándar por medio de las siguientes expresiones (Hillier, Hillier, & Lieberman, 2000; Farnum & Stanton, 1987; Méndez, 2019):

$$\mu = \frac{o + 4m + p}{6} \quad \text{con } p > o \quad (17)$$

$$\sigma^2 = \left(\frac{p - o}{6}\right)^2 \quad \text{con } p > o \quad (18)$$

Tomando ( 15 ) y ( 16 ) como un sistema de ecuaciones y resolviendo para  $\alpha$  y  $\beta$  se obtiene las expresiones

$$\alpha = - \frac{(A - \mu)(\mu^2 + \sigma^2 + AB - \mu(A + B))}{(A - B)\sigma^2} \quad (19)$$

$$\beta = \frac{(B - \mu)(\mu^2 + \sigma^2 + AB - \mu(A + B))}{(A - B)\sigma^2} \quad (20)$$

Si se toma  $A = o$  y  $B = p$ , es posible definir completamente los 4 parámetros requeridos en la distribución beta generalizada.

La expresión ( 18 ) se basa en una semejanza entre la distribución beta y la distribución normal, que supone que la desviación estándar es aproximadamente una sexta parte del rango donde se define (Farnum & Stanton, 1987). Así mismo, la estimación de la media a través de ( 17 ) es comúnmente utilizada sin la necesidad de una demostración rigurosa. Sin embargo, Farnum y Stanton (1987) derivan una expresión analítica para  $\mu_x$  y muestran gráficamente la estrecha relación entre ( 15 ) y ( 17 ), presentando como resultado principal que dicha relación es oportuna para ser utilizada cuando se cumplen las tres siguientes condiciones:

1.  $\alpha, \beta > 2$
2. El intervalo  $(A, B)$  es relativamente pequeño
3. El valor más probable  $m$  cumple

$$A + 0.13(B - A) < m < B - 1.3((B - A)) \quad (21)$$

Estos autores, también proponen estimaciones más certeras para

$$m < A + 0.13(B - A) \quad \text{y} \quad m > B - 1.3((B - A)) \quad (22)$$

A continuación, se presenta un ejemplo de aplicación de la distribución beta, considerando los valores mínimo, máximo y medio como los valores optimista, pesimista y más probable.

### Ejemplo de aplicación de la distribución beta

En la Tabla 0-7 Tiempo entre el inicio consecutivo de dos unidades de transporte público. se muestra el tiempo entre el inicio de recorridos de dos unidades de transporte público consecutivas, en una línea en CDMX.

**Tiempo entre dos salidas consecutivas de unidades de transporte público**

Datos		Estadísticas básicas
1.73	9.57	Mínimo= 1.73
2.42	9.78	Máximo= 15.15
8.70	15.15	Promedio= 8.12
9.47		Mediana= 9.47

*Tabla 0-7 Tiempo entre el inicio consecutivo de dos unidades de transporte público.*

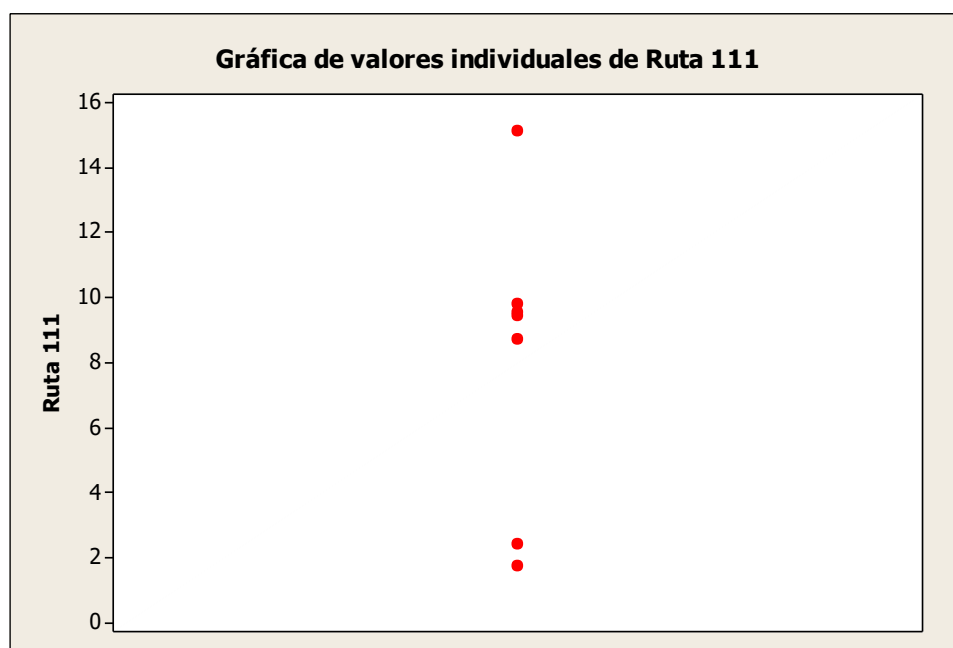
*Fuente: Elaboración propia (2020).*

Para la estimación de los parámetros  $\alpha, \beta$  se tomarán

$o = 1.73$ , el valor mínimo observado

$p = 15.15$ , el valor máximo observado

$m = 9.47$ , la mediana de los valores observados



Gráfica 0-3 Gráfica de valores individuales, tiempo entre dos salidas consecutivas de la ruta R111.  
Fuente: Elaboración propia (2020).

En este caso, los parámetros  $o, p$  y  $m$  no fueron estimados por expertos, como comúnmente suele suceder en el método PERT, sino que la información se obtuvo a partir de una pequeña muestra de tamaño 7. La definición de  $o$  y  $p$  resulta intuitiva, sin embargo, en el caso del valor más significativo ya que, al tratarse de pocos datos, el promedio puede no ser la medida de tendencia central más representativa y sesgar la interpretación respecto a la distribución de los datos. Además, se puede apreciar que 3 de los 7 datos se encuentran cercanos  $m=9.47$ , por lo que se esperaría que una distribución representativa de los datos muestre alta probabilidad a su alrededor.

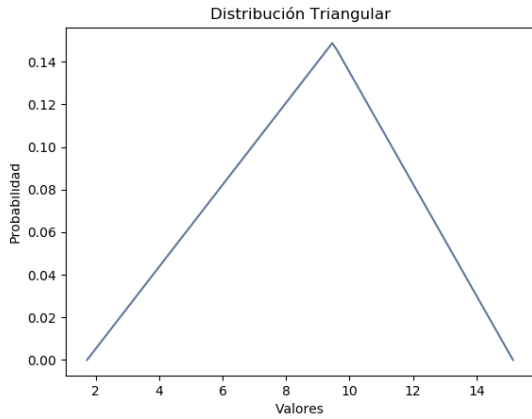
Un primer acercamiento puede ser la distribución triangular (Gráfica 0-8) con los siguientes parámetros:

*Valor mínimo* =  $o = 1.73$

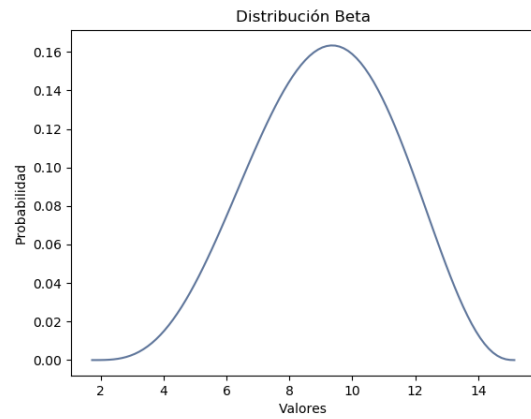
*Valor máximo* =  $p = 15.15$

*Valor modal* =  $m = 8.47$





*Gráfica 0-8 Distribución triangular  
(mínimo=1.73, máximo=15.15, moda=8.47)  
Fuente: Elaboración propia (2020).*



*Gráfica 0-9 Distribución Beta  
( $\alpha = 4.35, \beta = 3.54, A = 1.73, B = 15.15$ )  
Fuente: Elaboración propia (2020).*

Por otro lado, si estimamos los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  por medio de ( 19 ) y ( 20 ) y tomamos  $A = o$  y  $B = p$ , la función de distribución de probabilidad Beta toma la forma de la Gráfica 0-9. Observemos que su gráfica corresponde a una curva “suave” que disminuye la probabilidad en los valores cercanos a los extremos  $A = 1.73$  y  $B = 15.15$ , en comparación con la distribución triangular.

## ANEXOS

### ANEXO A: MODOS DE TRANSPORTE DE LA CDMX

#### I. Sistema de Transporte Colectivo – Metro (STC)

El SCT es un organismo público descentralizado cuyo objeto principal es la operación y explotación de un tren rápido que utiliza energía eléctrica para su funcionamiento, y realiza recorridos subterráneos, en superficie y elevados, para proporcionar un servicio de transporte a la población de la ZMVM, (México\_a, 2018)

La red cuenta con una longitud de 226.488 Km en servicio, un total de 12 líneas (2 ferreas y 10 neumáticas) y 195 estaciones. La mayoría de las líneas operan en la Zona centro de la CDMX y solo dos en el Estado de México. El parque vehicular está constituido por 384 trenes (321 neumáticos y 63 férreos), cuya capacidad varía de acuerdo con el número de vagones. La cantidad de trenes por línea puede variar por una redistribución del parque vehicular en función de las necesidades del servicio, (México\_a, 2018)

De acuerdo con las cifras de operación correspondientes al año 2018, en un día, se transportan 1,647 millones 475 mil 013 usuarios (México\_a, 2018)

El STC ofrece el servicio de transporte los 365 días del año en un horario de 5:00 a 24:00 horas en días laborables, de 6:00 a 24:00 en sábado y de 7:00 a 24 horas en domingos y días festivos. El precio por boleto es de \$5.00 (México\_a, 2018)

**Tabla 0-1 Capacidad de trenes que operan en el STC**

<i>Vagones por tren</i>	<i>Sentados</i>	<i>Parados</i>	<i>Total</i>
6	240	780	1,020
7	336	1,139	1,475
9	360	1,170	1,530

*Datos: (México\_a, 2018), con última actualización el 27 de marzo de 2019*



## II. Sistema de Transporte Eléctrico (STE)

Se trata de un sistema de transporte descentralizado que opera con unidades adquiridas por el Gobierno de la CDMX (Distrito Federal). Los servicios de transporte que este sistema ofrece a los usuarios es una alternativa de transporte con niveles bajos de contaminante. Cuenta con tres modalidades de transporte: Tren Ligero, Trolebús y taxi eléctrico.

- **Tren ligero:** Servicio tecnológicamente avanzado no contaminante que opera en el sur de la ciudad CDMX, en las delegaciones Coyoacán, Tlalpan, y Xochimilco. Cuenta con una línea de 13.04 kilómetros, 16 estaciones y 2 terminales. El parque vehicular se compone de 20 trenes dobles acoplados con cabina doble y su capacidad es de 374 pasajeros por unidad. El costo por viaje es de \$3 U.M y el horario de servicio es de 05:00 a 00:00 hrs de lunes a viernes, de 06:00 a 00:00 hrs en sábado y de 07:00 a 00:00 hrs en domingo.



Figura 0-2 Línea del Tren Ligero (STE).  
Fuente: (México\_b, 2018)

- Trolebús:** La red cuenta con 203.64 kilómetros y abarca los principales corredores de la ciudad CDMX en donde a principios de 2019 operaba un parque vehicular de 290 trolebuses distribuidos en 8 líneas. Para diciembre de 2019 la flota aumento en 63 unidades nuevas. Los costos son por boleto son de \$2 y \$4 y el horario de servicio varía en cada línea entre 04:00 y 01:00 hrs (México\_b, 2018).

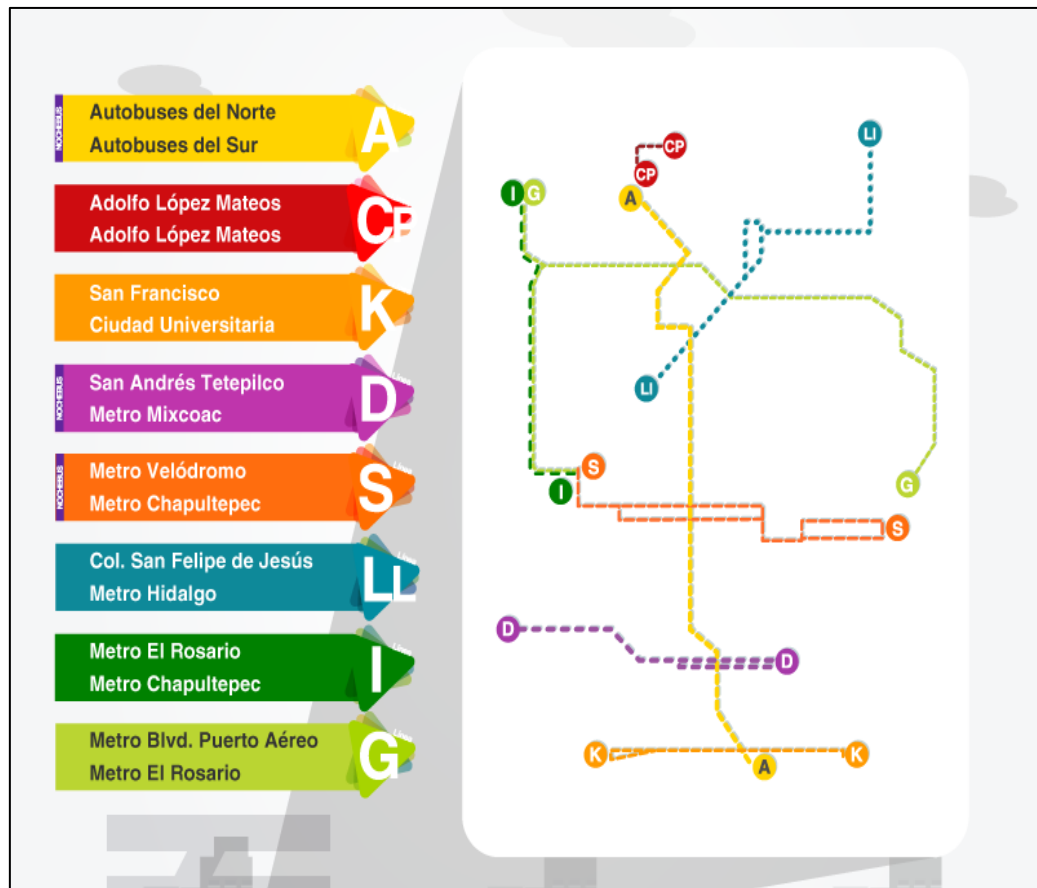


Figura 0-3 Líneas de Trolebús (STE)  
Fuente: (México\_b, 2018)

- Taxis eléctricos:** Proporcionan un servicio de transporte cómodo, sustentable y ecológico que favorece al medio ambiente y a la población de la CDMX en general. Los vehículos son unidades eléctricas con capacidad de 4 pasajeros. El servicio en esta modalidad permite recorrido personalizados en la ciudad de hasta 175 kilómetros. El costo por recorrido depende de la longitud de este, además de un costo fijo inicial de \$27.30. El horario de servicio es de 05:00 a 00:00 hrs, todos los días de la semana.

### III. Red de Transporte Público RTP

La RTP es una red de transporte público de pasajeros que opera con autobuses en las zonas conurbadas y periféricas de la ciudad. Su servicio atiende preferentemente a la población de escasos recursos y busca crear enlaces de conexión con otros sistemas de transporte, principalmente con el STC y las rutas del STE. La red cuenta con 103 rutas que conectan la CDMX a través de 7 modelos (Figura 0-4), y operan con 5 modalidades de servicio (Tabla 0-2)

#### Líneas de la Red de Transporte Público RTP

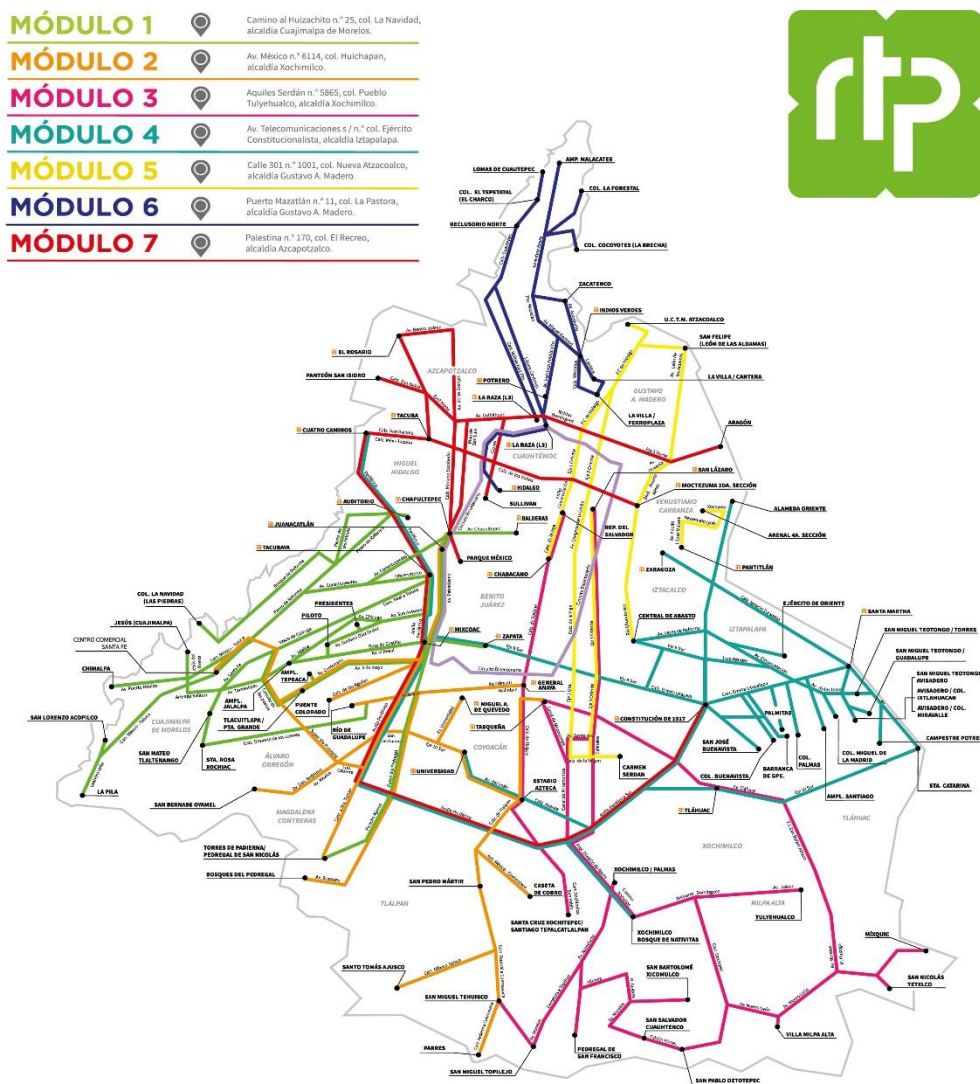


Figura 0-4 Líneas de la Red de Transporte de Pasajeros RTP  
Tomada y adaptada de (México\_c, 2018)

**Tabla 0-2 Características de las diferentes modalidades de servicio RTP.**

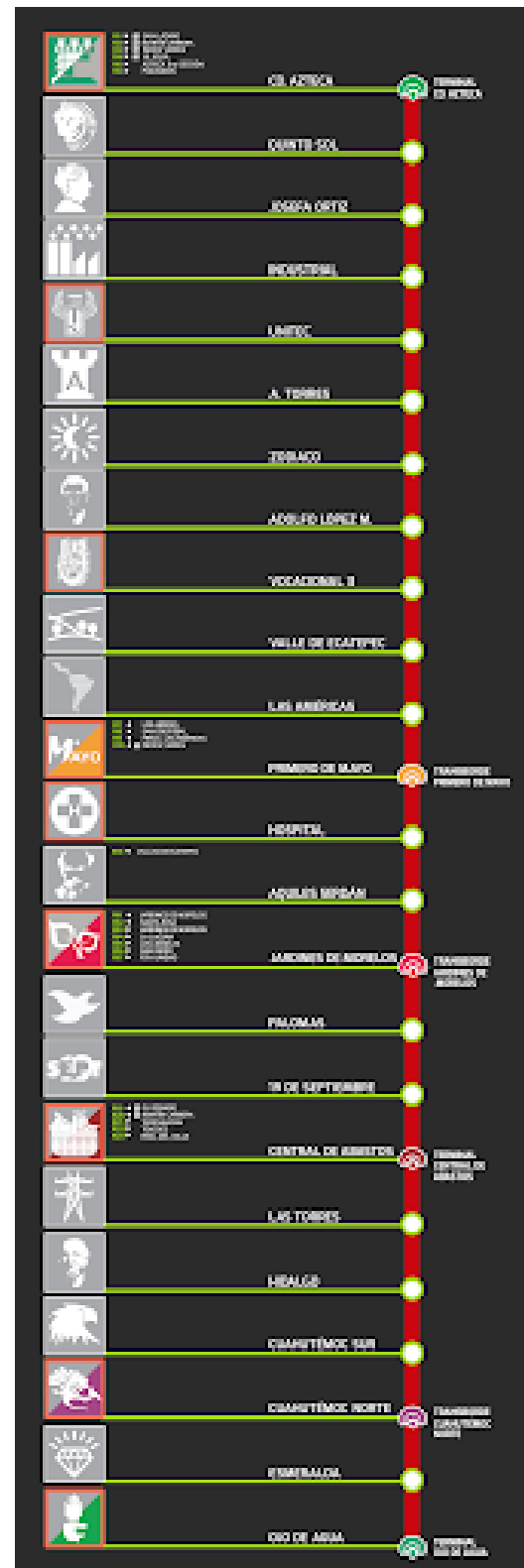
Modalidad	Costo	Horario	Cantidad de rutas
Ecobus	\$ 5.00	05:00-00.00	2
Expreso	\$ 4.00	05:00-00.00	23
Atenea	\$ 2.00	6:00-23:00	50
Ordinario	\$ 2.00	05:00-00.00	91
Nochebus	\$ 7.00	00:00- 05:00	7
Total de rutas:			173

*Datos: (México\_c, 2018)*

#### IV. Mexibus (transmasivo)

Es un sistema de transporte masivo del Estado de México que hace conexión con estaciones masivas del metro en la CDMX. Cuenta con una única ruta que tiene 16.5 Km., 24 estaciones de las cuales 3 fungen como terminales y 6 son de transferencia modal. El parque vehicular se compone de 59 autobuses en operación más 4 de reserva. Este sistema ofrece 4 modalidades de servicio, uno ordinario y 3 de servicio exprés, (Mexibús, 2016).

- Servicio ordinario: ofrece servicio realizando paradas en todas las estaciones de la línea en un horario de 4:00 a 01:40 hrs del día siguiente, de lunes a viernes y de 04:00 a 01:37 hrs (del día siguiente) en sábado, domingo y días festivos.
- Servicio Exprés: Realiza parada únicamente en ciertas estaciones y tiene un horario de servicio entre 5:00 y 00:00 con pequeñas variaciones entre cada una de las modalidades.



*Figura 0-5 ruta Mexibús (Trnasmasivo). Tomado de ( Mexibús, 2016)*







## VI. Tren suburbano

El Tren Suburbano es un sistema de transporte que conecta al Estado de México con la CDMX, consta de una línea que va de Buenavista a Cuautitlán con 5 estaciones intermedias. Es un modo de transporte que permite realizar recorridos de larga distancia en poco tiempo, disminuyendo el tiempo de viaje de los usuarios.

La longitud de la red es de 27 km que atienden la demanda de transporte de cuatro municipios del Estado de México (Tlalnepantla, Tultitlán, Cuautitlán y Cuautitlán Izcalli) y de dos delegaciones de la CDMX (Cuauhtémoc y Azcapotzalco).

Las unidades que operan son eléctricas y ligeras que se caracterizan por su modularidad y adaptabilidad al servicio. Cuentan con equipamiento completo y adaptado a PRM (Personas con movilidad reducida). Existen tres tipos de trenes: de tres, cuatro y ocho coches con capacidades de 842 y 1138 y 2276 pasajeros respectivamente.

El horario de servicio es de 5:00 hrs a 0:30 hrs de lunes a viernes, de 6:00 hrs a 0:30 hrs. en sábados y de 7:00 hrs a 0:30 hrs los domingos. La tarifa de un viaje corto (de 0 a 12.89 km) es de \$8.0 U.M y la de un viaje largo (de 12.9 a 25.6 km) corresponde a \$19.0. El sistema de pago es por medio de tarjetas (Ferrocarriles Suburbanos, 2019).



Figura 0-7 Ruta del Tren Suburbano CDMX-Estado de México  
Fuente: (Ferrocarriles Suburbanos, 2019)

## VII. Transporte concesionado de baja capacidad (Microbuses y Combis)

Es un sistema de transporte concesionado que consiste en camiones de menor tamaño a los autobuses, agrupa a los microbuses (también llamados camiones, micros o peseros) y combis. Las rutas abarcan vías primarias y secundarias a lo largo de toda la ciudad, pero hasta 2018 no se contaba con un mapa oficial debido a su variabilidad. Sin embargo, en el banco de datos de la CDMX a partir de 2019 se publicó información y mapas georreferenciados, correspondientes a los reportes realizados por los concesionarios ante SEMOVI. Se estima que dicha información tiene un 70 % de confiabilidad respecto a la operación real de las rutas, (México\_e, 2018)

La tarifa de este modo de transporte varía entre \$5.00 y \$6.50, de acuerdo con la distancia del recorrido. El horario de operación es de 06:00 a 23:00 hrs de lunes a domingo.

## VIII. Servicio de taxi

La CDMX también cuenta con sistema de transporte Taxi, que es un modo de transporte individual o de baja capacidad que hace recorridos personalizados por la ciudad. La tarifa de los viajes varía de acuerdo a la longitud del recorrido y el tipo de taxi (Semovi\_a, 2018):

- **Taxi Libre:** 8.74 pesos banderazo; 1.07 pesos cada 250 metros o 45 segundos; el servicio nocturno, de las 23:00 a las 06:00 horas, con 20 por ciento adicional.
- **Taxi de Sitio:** 13.10 pesos banderazo; 1.30 pesos cada 250 metros o 45 segundos; el servicio nocturno, de las 23:00 a las 06:00 horas, con 20 por ciento adicional.
- **Radio Taxi:** 27.30 pesos, banderazo; 1.84 pesos cada 250 metros o 45 segundos; el servicio nocturno, de las 23:00 a las 06:00 horas, con 20 por ciento adicional.

## IX. ECOBICI

ECOBICI es un sistema de bicicletas públicas de la CDMX que ha integrado a la bicicleta como parte esencial de la movilidad. Este modo de transporte está dirigido a los habitantes de la ciudad y sus alrededores, así como a turistas.

El sistema cuenta con ciclo estaciones que permiten al usuario acceder al sistema y permite identificarse mediante su tarjeta o código de acceso, tomar y dejar bicicletas eléctricas y visualizar a través de un mapa la disponibilidad de bicicletas en tiempo real. Actualmente el sistema cuenta con 480 ciclo estaciones y más de 6 800 bicicletas que dan servicio en 55 colonias de la CDMX, en un área de 38 kilómetros cuadrados (Mexico\_g, 2018).

Existen cuatro tipos de suscripciones: de un día (\$108), de tres días (\$216), de una semana (\$360), y de un año (\$480), que permiten viajes de duración ilimitada. Los primeros 45 min son gratis en todas las modalidades y los viajes que superan este tiempo tienen un costo excedente acorde a la duración del viaje.

## ANEXO B: FORMATOS PARA ENTREVISTAS EN CETRAM UNIVERSIDAD

<p><b>Formato 1</b></p> <p><b>N. Entrevista:</b></p> <p><b>Datos generales</b></p> <p>Nombre de la persona entrevistada:</p> <p>Nombre de la base:</p> <p>Fecha : <span style="float: right;">Horario:</span></p> <p>Tipo de buses en operación : (Mi descripción)</p> <p><b>Sobre las rutas</b></p> <p>¿Cuántas rutas diferentes hacen base o parada cerca a la estación del metro CU?</p> <hr/> <p>¿Cuántas de esas rutas toman la Av. Delfín Madrigal desde el metro hasta el cruce Av. Imán, Av. Aztecas?</p> <hr/> <p>¿Cuántas de esas rutas continúan por Av. Imán hasta llegar a una parada de Perisur?</p> <hr/> <p>¿Cuál es la parada más cercana a la estación del MB Perisur?</p> <hr/> <p><b>En relación con las rutas que pasan por Perisur</b></p> <p>De acuerdo al número de pasajeros que abordan las unidades de buses (en esta parada) de lunes a viernes en un horario de 7:00 a 10:00 am,</p> <p>¿Cómo considera la utilización del servicio por parte de los pasajeros?</p> <p><input type="checkbox"/> Nivel bajo      <input type="checkbox"/> Nivel medio      <input type="checkbox"/> Nivel Alto</p> <p>¿Qué porcentaje de ocupación tienen las unidades al salir de esta parada?</p> <p>____%</p> <p>Dentro de este horario, ¿Cuál es la hora de mayor demanda/operación?</p> <p>De _____ am a _____ am.</p> <p>¿A qué cree que se debe?</p> <hr/>
---

**Formato 2**

N. Entrevista:

Unidades	Descripción	Capacidad			Antigüedad de las unidades
		Asientos	Cap. Pasajeros Parados	Cap. Total	
Bus					
1					
2					
3					
4					
5					

**Conceptos**

- Tiempo de ciclo** Desde que sale de la base hasta que regresa nuevamente.
- Tiempo en base** Desde que llega a la base hasta que se dispone a subir pasajeros para iniciar un nuevo recorrido
- Tiempo descenso** Desde que llega a la base hasta que el ultimo pasajero que viene a bordo desciende de la unidad
- Tiempo ascenso** Desde que la unidad se dispone para el ascenso de pasajeros hasta que abordan todos los pasajeros en base
- Tiempo ascenso-salida** Desde que todos los pasajeros en base abordan hasta que la unidad sale de la estación
- Intervalo de salida** Tiempo entre salidas consecutivas de dos unidades de la misma ruta

Formato 3								
N. Entrevista:								
Características del recorrido								
N.Ruta	Ruta			Pasa por			Tipo de bus	Porcentaje de ocupación al salir de esta parada
	Origen	Destino	Se anuncia como	Delfín Madrigal	Av. Iman	Parada Perisur		
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								

Formato 4								
N. Entrevista:								
N.Ruta	Tiempos de operación						Otros	
	Tiempo de ciclo	Tiempo en base	Tiempo descenso	Tiempo ascenso	Tiempo ascenso-salida	Intervalo de salida	Operadores en este horario	
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								

## ANEXO C: FORMATO PARA ENTREVISTAS EN PERISUR

<p><b>Formato 1</b></p> <p><b>N. Entrevista:</b></p> <p><b>Datos generales</b></p> <p>Nombre de la persona entrevistada:</p> <p>Nombre de la base:</p> <p>Fecha : <span style="float: right;">Horario:</span></p> <p>Tipo de buses en operación : (Mi descripción)</p> <p><b>Sobre las rutas</b></p> <p>¿Cuántas rutas diferentes hacen base o parada en esta zona?</p> <hr/> <p>¿Cuántas de esas rutas vienen desde/para CU?</p> <hr/> <p>¿Cuántas de esas rutas vienen desde/para Taxqueña?</p> <hr/> <p>¿Cuáles son los otros orígenes/destinos de los camiones que hacen parada aquí?</p> <hr/> <p>¿Hay camiones/rutas que pasan por aquí y no hacen parada?</p> <hr/> <p><b>En relación con las rutas que hacen parada aquí</b></p> <p>De acuerdo al número de pasajeros que abordan las unidades de buses (en esta parada) de lunes a viernes en un horario de 7:00 a 10:00 am,</p> <p>¿Cómo considera la utilización del servicio por parte de los pasajeros?</p> <p><input type="checkbox"/> Nivel bajo      <input type="checkbox"/> Nivel medio      <input type="checkbox"/> Nivel Alto</p> <p>¿Qué porcentaje de ocupación tienen las unidades al salir de esta parada?</p> <p>____%</p> <p>Dentro de este horario, ¿Cuál es la hora de mayor demanda/operación?</p> <p>De _____ am a _____ am.</p> <p>¿A qué cree que se debe?</p> <hr/>
---

Ruta: _____ Origen: _____ Destino: _____
Aproximadamente, ¿cuántos pasajeros vienen a bordo cuando el camión pasa por aquí?
¿Cuántos pasajeros bajan aquí?
¿Cuántos pasajeros suben en esta parada?
Aproximadamente ¿cuánto tiempo les toma hacer esta parada?
¿Cuál es la siguiente parada de esta ruta?

## ANEXO D: CODIGO DEL MODELO M1

A continuación, se presenta el código de estructuración del modelo M1, considerando los parámetros de entrada del sentido S1 del recorrido. El mismo código fue utilizado para obtener resultados del sentido S2, a partir de los parámetros de entrada correspondientes. El código se presenta en 3 secciones:

- **Parámetros de entrada:** Ilustra el formato utilizado para los parámetros de entrada.
- **Funciones auxiliares:** Presenta el nombre y una breve descripción de funciones auxiliares creadas previamente a la estructuración del modelo. También son utilizadas en la validación y el análisis de resultados. No se presenta la estructura completa de cada una.
- **Estructura del modelo:** Presenta la codificación del modelo utilizando las funciones auxiliares.

### Parámetros de entrada

```
#PASAJEROS QUE SUBEN EN CADA PARADA
```

```
P1_S=["DP",2.167]
P2_S=["DP",1.877]
P3_S=["DP",1.08]
P4_S=["DT",[0,1,2],[0.21,0.71,0.08]]
P5_S=["DP",1.263]
P6_S=["DT",[0,1,2,3],[0.23,0.56,0.13,0.08]]
P7_S=["DTR",[0,1,2,3,4],[0.15,0.24,0.15,0.06,0.06],[[5,9],[10,18]],[0.15,0.19]]
#Paradas para R76.1
p1_S=["DT",[0,0],[0.5,0.5]]
p2_S=["DT",[0,1],[0.09,0.91]]
p3_S=["DT",[0,1],[0.1,0.9]]
p4_S=["DT",[0,1,2,3],[0.59,0.29,0.06,0.06]]
```

```
#PASAJEROS QUE BAJAN EN CADA PARADA
```

```
P1_B=["DT",[0,0],[0.5,0.5]]
P2_B=["DT",[0,1,2],[0.82,0.13,0.05]]
P3_B=["DP",1]
P4_B=["DP",0.571]
P5_B=["DT",[0,1,2,3,4,5,6,12,13],[0.404,0.175,0.088,0.211,0.035,0.018,0.035,0.018,0.018]]
P6_B=["DTR",[0,1,2,3],[0.64,0.19,0.06,0.04],[[4,10]],[0.07]]
P7_B=["DTR",[0,1,2,3,4,5],[0.22,0.21,0.15,0.19,0.12,0.04],[[6,8]],[0.07]]
#paradas para R76.1
p1_B=["DT",[0,1],[0.57,0.43]]
p2_B=["DP",2.83]
p3_B=["DT",[0,1,2,3,4,5],[0.3,0.2,0.1,0.2,0.1,0.1]]
p4_B=["DP",2.118]
```

```
#CARACTERISTICAS DE LAS RUTAS
```

```
R40={"nombre":"R40","ocupacion_inicial":[10,60],"intervalo_salida":["normal",4.21,2],"vehiculo":
:[29,33,30]}
R60={"nombre":"R60","ocupacion_inicial":[60,85],"intervalo_salida":["beta",2.96,4.61,0.18,9.48]
,"vehiculo":[27,35,30]}
R1_3={"nombre":"R1_3","intervalo_salida":["beta",4.357,3.5483,0.05,5.58],
"ocupacion_inicial_M":[10,45],"vehiculo_M":[18,24,20],
"ocupacion_inicial_CM":[10,33],"vehiculo_CM":[31,36,33]}
R111={"nombre":"R111","ocupacion_inicial":[35,80],"intervalo_salida":["beta",4.357,3.5483,1.73,
15.15],
"vehiculo_1":[31,37,33],"vehiculo_2":[45,45,40]}
R76={"nombre":"R76","ocupacion_inicial":[70,95],"intervalo_salida":["normal",2.94,1.32],"vehicu
lo"::[29,33,30]}
R76_1={"nombre":"R76_1","ocupacion_inicial":[75,100],"intervalo_salida":["beta",3.025,4.593,0.8
6,5.466],"vehiculo"::[16,20,5]}
```



## Funciones Auxiliares

```
#Genera una variable aleatoria por tabla de probabilidades
def probabilidad_tabla(valor, probabilidad):

#Genera una variable aleatoria considerando valores y rangos de una tabla
def probabilidad_tabla_rango(valor, p1,rango,p2):

#Generacion aleatorios en parada (suben o bajan)
def datos_parada(parametro): #Parametro en formato PX_S/B

#Crea el vector título, para los arreglo de UT y P
def titulos(id_parada,n_paradas): #id_paradas=Identificador de paradas_(cedena)#Crear el

#Define el tipo de vehiculo y su capacidad para cada UTP que inicia un recorrido.
def pasajeros_inicio(ruta):

#Crea una lista ("Salda") con el momento de salida de las UTP
def salida_camiones(ruta,T_simulacion):

#Define la categoría de ocupación de un camion de acuerdo el porcentaje de ocupación.
def cat_ocupacion(pasajeros, asientos, parados):

#Define la categoría de ocupación de una vagoneta de acuerdo el porcentaje de ocupación.
def cat_ocupacion_vag(pasajeros):

#Junta 2 o más tablas conservando un encabezado (el número de columnas debe coincidir)
def juntar_arreglos(lista_T):

#Devuelve una lista de los elementos diferentes en la lista original
def extraer_e_diferentes(lista):

# Extrae las columnas en la lista desde el arreglo y lo convierte a un diccionario
def extraer_columnas( arreglo, encabezado, lista):

# Devuelve los valores modales (mas de un valor)
def f_moda(datos):

#Genera un archivo Excel para validación de una ruta
def validacion_rutas(n_it, ruta, PS, PB, horas, encabezado, columnas):

#Genera resultados por réplicas independientes.
def estadisticas_UT(arreglo, encabezado, quitar_col):
```

## Estructura del modelo M1 (una réplica)

```
#Genera un arreglo (UT) con resultados de UTP y un arreglo P con resultados de
paradas (con encabezado)
def replica(rutas, paradas_S, paradas_B, horas_sim, Excel):

    ##VARIABLES INICIALES
    decimales=2 #define el número de decimales que se ocuparan en esta funcion
    n_rutas=len(rutas) #Numero de rutas diferentes
    n_paradas=len(paradas_S) # Número de paradas (Debe coincidir con len de paradas_B)
    T_sim=60*horas_sim #Tiempo de la simulación en minutos
    encabezado=titulos("P",n_paradas+1) #titulo de columnas A_UT y A_paradas (lista)
    A_UT=[] #Inicia como una lista vacia
    A_P=[] #Inicia como una lista vacia

    ## 'EJECUCION PARA CADA RUTA-CAMION (i) DE LA LISTA "rutas"
    for i in range(0,n_rutas):
        ruta=rutas[i][0] #Extrae cada ruta de la lista de rutas
        salida=salida_camiones(ruta,T_sim) #lista del tiempo de salida de los camiones
        n_camiones=len(salida) #total de camiones que salen

        ## 'PARA CADA CAMION QUE SALE SE GENERAN UN VECTOR DE DATOS (Iniciales, ocupacion
        y % en cada paradas)
        for k in range(0,n_camiones): #Crea un nuevo conjunto de datos para cada camion
        que sale
            d_general=[k+1,ruta["nombre"],salida[k]] #Datos generales del dato_fila
            [Indice, #Ruta, tiempo_salida]
            d_inicio=list(pasajeros_inicio(ruta)) # [asientos, parados, capacidadT y
            ocupacion_i] por UT

            capacidad=d_inicio[2] #Capacidad Total de la UT_k
            ocupacion=d_inicio[3] #Ocupacion inicial de la UT_k

            d_ocupacion=[] #Almacena el % de ocupacion de la UT en cada aparada
            d_paradas=[] #Almacena S,B,T del total de paradas

            d_max_ocup=[0,0] #Almacena la ocupacion maxima y el indice de la parada de
            maxima carga
            d_max_ocup[0]=ocupacion

            ## 'EN CADA PARADA DE LA LISTA "Paradas_S y Paradas_B" se calcula S,B,T
            for j in range(0,n_paradas):
                bajan = datos_parada(paradas_B[j])
                suben=datos_parada(paradas_S[j])
                disponibles=capacidad-ocupacion+bajan
                if suben > disponibles: #Condicion de disponibilidad para subir
                    # print ("suben: "+ str(suben))
                    suben=disponibles

                ocupacion=ocupacion+suben-bajan #Ocupacion en la parada j
                p_ocupacion=round(100*(ocupacion/capacidad),decimales) #Porcentaje de
                ocupacion en la parada j

                #Estadisticas de ocupacion en A_UT
                d_ocupacion.append(ocupacion)
                d_ocupacion.append(p_ocupacion)

                #Estadisticas para A_P
                d_paradas.append(suben)
                d_paradas.append(bajan)
                d_paradas.append(suben+bajan)

                #Actualiza d_max_ocup si es necesario
                if ocupacion > d_max_ocup[0]:
                    d_max_ocup[0]=ocupacion
                    d_max_ocup[1]=j+1
```

```

#ÖObtiene la categoria de ocupacion de acuerdo a la capacidad de la UT
#Condicion especial para vagonetas
# if ruta["nombre"]=="R76_1":
    cat_o=cat_ocupacion_vag(ocupacion)
else: cat_o=cat_ocupacion(ocupacion,d_inicio[0],d_inicio[1])

#ÓAgrega una fila de datos en A_UT y A_P por cada camion que sale
nuevo_dato_UT=(d_general+d_inicio+d_ocupacion+d_max_ocup+[cat_o])
A_UT.append(nuevo_dato_UT)
A_P.append(d_paradas)

## IMPRIME Y EXPORTA RESULTADOS EN FORMATO DE TABLA_Ö
#Se crean las tablas
T_UT=pd.DataFrame(A_UT, columns=encabezado[0])
T_P=pd.DataFrame(A_P, columns=encabezado[1])

#Se imprien las tablas
# print ("Resultados de la ruta " + ruta["nombre"]+ " \n" + str(T_UT))

# print("El arreglo de UT es:\n " + str(T_UT))
# print("El arreglo de Paradas es:\n" + str(T_P))

#Se crean los archivos excel si las variables Excel=1
# if Excel == 1:
# ubicacion="D:/SEMESTRES UNAM/Simulacion Python Tesis/S1/Resultados UT-
P/Resultados.xlsx"
# writer = pd.ExcelWriter(ubicacion)
# T_UT.to_excel(writer, sheet_name="UT")
# T_P.to_excel(writer, sheet_name="P")
# writer.save()

return A_UT, encabezado[0], A_P, encabezado[1] #En formato de lista

```