



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
Ingeniería de Sistemas-Investigación de Operaciones

MODELACIÓN Y DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE PUMABÚS

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
SONIA MARCELA CIFUENTES MARTÍNEZ

TUTORA  
DRA. ANGÉLICA DEL ROCÍO LOZANO CUEVAS  
INSTITUTO DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, Cd. Mx, septiembre 2016

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dra. Idalia Flores De La Mota  
Secretario: Dr. Ricardo Aceves García  
Vocal: Dra. Angélica del Rocío Lozano Cuevas  
1<sup>er.</sup> Suplente: M.I. José Antonio Rivera Colmenero  
2<sup>do.</sup> Suplente: M.I. Luis Alejandro Guzmán Castro

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Universidad Nacional Autónoma de México

**TUTOR DE TESIS:**

ANGÉLICA DEL ROCÍO LOZANO CUEVAS

-----  
**FIRMA**

(Segunda hoja)

## **AGRADECIMIENTOS.**

A México por regalarme dos de los mejores años de mi vida.

A la Dra. Angélica Lozano por guiarme, compartir su conocimiento, dedicarme su tiempo y darme su apoyo.

A mis sinodales por tomarse el tiempo de leer este trabajo y por sus aportaciones.

A mis padres por sus enseñanzas, esfuerzo y amor incondicional.

A mis hermanos por nuestros momentos de felicidad y por existir.

A Yann por tu amor, paciencia, espera y por todos nuestros momentos.

A mis abuelos, a Javier y Ernesto por tanto cariño.

A mis amigos del alma: Andrea, Vanesa, Carlos y Diego por siempre estar ahí a pesar de la distancia.

A mis amigos mexicanos: Abner, Adrián, Armando, Gabi Mares y Gabi Larre por abrirme las puertas de su casa y las rumbas pero sobre todo por su amistad y compañía. Los llevo en el corazón.

A CONACYT por el apoyo como becaria.

## Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN.....	7
<b>1. SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS.....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Definición de transporte público de pasajeros.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2 Características de los modos de transporte público de pasajeros.....</b>	<b>10</b>
1.2.1 Las vías.....	10
1.2.2 Los sistemas tecnológicos.....	11
1.2.3 Tipos de servicios.....	13
<b>1.3 Modos de transporte público de pasajeros.....</b>	<b>15</b>
1.3.1 Clasificación de modos de transporte público de pasajeros por Vuchic (2007)	15
1.3.2 Clasificación de modos de transporte público de pasajeros por Larwin (1999)	16
<b>1.4 Características de los sistemas de transporte.....</b>	<b>17</b>
1.4.1 Rendimiento o desempeño del sistema.....	18
1.4.2 Nivel de servicio.....	18
1.4.3 Impactos.....	19
1.4.4 Costos.....	19
<b>1.5 Componentes físicos de los sistemas de transporte.....</b>	<b>20</b>
<b>1.6 Red de transporte público.....</b>	<b>20</b>
1.6.1 Estructura física de las rutas.....	20
1.6.2 Estructura física de la red.....	21
1.6.3 Características de una red de transporte.....	24
<b>1.7 Planificación del transporte urbano de pasajeros.....</b>	<b>26</b>
1.7.1 Definición de objetivos.....	26
1.7.2 Recolección de Información.....	28
1.7.3 Modelación.....	28
1.7.4 Evaluación y seguimiento.....	33
<b>1.8 Dimensionamiento de una ruta de transporte.....</b>	<b>33</b>
<b>1.9 Transporte público en la Ciudad de México.....</b>	<b>37</b>
1.9.1 Transporte público concesionado.....	38



1.9.2	Transporte público no concesionado .....	40
2.	<b>SISTEMA DE TRANSPORTE INTERNO PUMABÚS .....</b>	<b>45</b>
2.1	Introducción .....	45
2.2	Rutas del sistema de transporte Pumabús .....	46
2.3	Oferta del sistema de transporte interno Pumabús .....	75
2.3.1	Flota vehicular .....	78
2.3.2	Frecuencias .....	78
2.4	Estimación de horas de máxima demanda del Sistema de Transporte Interno Pumabús .....	80
3.	<b>OBTENCIÓN DE LA MATRIZ ORIGEN-DESTINO DE CIUDAD UNIVERSITARIA .....</b>	<b>84</b>
3.1	Introducción .....	84
3.2	Determinación de la demanda de cada nodo .....	87
3.3	Asignación de viajes a estaciones externas .....	90
3.3.1	Criterios de asignación .....	93
3.3.2	Proceso analítico jerárquico.....	96
3.3.3	Definición de signos de la ponderación de los criterios en la función objetivo.....	99
3.3.4	Asignación.....	100
3.3.5	Asignación de viajes atraídos o generados en automóvil particular.....	101
3.4	Matriz origen-destino por modo de transporte.....	106
3.5	Matrices origen-destino interna por modo de transporte: "posibles usuarios del Pumabús" .....	110
3.6	Análisis de las líneas de deseo de viajes internos en CU .....	126
3.7	Matriz origen-destino interna en Pumabús .....	127
4.	<b>ASIGNACIÓN DE TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS Y DIAGNÓSTICO DE LA RED...</b>	<b>129</b>
4.1	Introducción .....	129
4.1.1	El problema de línea común de autobuses (Bus Common Line Problem).....	132
4.1.2	Modelo de asignación de transporte público de equilibrio del usuario (UE: User Equilibrium) .....	133
4.1.3	Modelo de asignación de transporte público estocástico de equilibrio del usuario (SUE:The Stochastic User Equilibrium Model) .....	139

4.1.4	Modelo de asignación de transporte público con modelo de confiabilidad Probit (Probit-Type Reliability-Based Transit Network Assignment) .....	146
4.1.5	Calibración y validación de modelos de asignación de transporte público ....	152
4.2	Asignación de transporte público: Pumabús .....	160
4.2.1	Modelo de asignación de transporte público estocástico de equilibrio del usuario (SUE) en TransCAD .....	160
4.2.2	Parámetros para la ejecución de la asignación de transporte público del sistema Pumabús.....	165
4.2.3	Resultados de la asignación de transporte público estocástico de equilibrio del usuario para viajes realizados entre las 7 y las 8 horas. ....	168
4.2.4	Resultados de la asignación de transporte público estocástico de equilibrio del usuario para viajes realizados entre las 15 y las 16 horas .....	188
4.2.5	Tamaño de flota vehicular .....	208
4.2.6	Trabajo futuro .....	209
5.	CONCLUSIONES.....	212
	REFERENCIAS .....	215
	Anexo 1: pruebas de bondad de ajuste de los tiempos de paso entre vehículos de las rutas del Pumabús.....	219
	Anexo 2: Modelo Logit-Tamaño de Ruta (Size-Path).....	223
	Anexo 3: Algoritmo Frank-Wolfe.....	224

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, las ciudades presentan graves problemas con la calidad de su aire; los índices de contaminación incrementan con la industrialización, el aumento de la adquisición de vehículos particulares, la obsolescencia de vehículos, entre otros factores. Ante este problema, una de las políticas de acciones inmediatas que adoptan los gobiernos son las restricciones vehiculares, como ejemplos podemos citar a: Ciudad de México, Medellín (Colombia), Bogotá (Colombia) y Santiago de Chile.

Las restricciones vehiculares, se hacen con el objetivo de que las personas que se movilizan en vehículos particulares opten por utilizar el transporte público u otro tipo de transporte como la bicicleta para así disminuir los índices de contaminación del aire. Sin embargo, muchas veces los sistemas de transporte públicos no cuentan con la capacidad suficiente para responder a esta demanda. El incremento en la congestión en los sistemas de transporte público se traduce en mayores tiempos de espera por un vehículo que tenga asientos disponibles e incremento de incomodidad en los viajes para los usuarios. El realizar un diagnóstico oportuno sobre una red de transporte permitirá contrarrestar las desventajas de utilizar el transporte público y por ende hacerlo un sistema de transporte más eficiente para atraer nuevos usuarios. El proceso de diagnóstico abarca distintos frentes como identificar las necesidades de viajes reales, también la identificación de parámetros que caracterizan la selección de ruta por parte de los usuarios, además de un análisis detallado de la utilización de las rutas y posteriormente la realización de propuesta para dar solución a los problemas o falencias identificadas.

El **objetivo** de esta tesis es presentar y aplicar una metodología para realizar el diagnóstico de la red del Sistema de Transporte Interno de Ciudad Universitaria: Pumabús, que contribuya a identificar las rutas de mayor congestión del sistema, así como las rutas con niveles bajos de utilización.

Para alcanzar el objetivo propuesto fue necesario realizar una investigación acerca de las generalidades del transporte público de pasajeros, que incluye conceptos básicos hasta la modelación de los sistemas, ésta es presentada en el capítulo 1.

En el capítulo 2, se pone a disposición información concerniente al sistema de transporte: Pumabús, su estructura física y sus características de operación.

El capítulo 3, aborda una breve introducción a las metodologías existentes para la obtención de la matriz origen-destino y luego se presenta la metodología propuesta y utilizada para la obtención de la matriz origen-destino de los viajes realizados en Pumabús.

En el capítulo 4, se presenta algunos modelos de asignación de tránsito en redes congestionadas y un apartado donde se presenta la metodología a seguir para su calibración. Posteriormente se exponen los resultados obtenidos al utilizar el modelo de asignación de tránsito estocástico

para Equilibrio del Usuario (SUE) del programa TransCAD con su respectivo análisis y diagnóstico.

En el capítulo 5, se presentan las conclusiones de esta tesis.

Finalmente, se presentan las referencias de las fuentes que se consultaron para la elaboración de esta tesis.

Además, se presentan tres anexos, el primero contiene las pruebas de bondad de ajuste de los tiempos de paso entre vehículos de las rutas del Pumabús, el segundo contiene el Modelo Logit-Tamaño de Ruta (modelo citado en la sección 4.1) y el tercer anexo contiene el algoritmo de Frank-Wolfe, el cual es mencionado en la sección 4.1.1.

## **1. SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS**

En este capítulo se da una introducción al concepto de sistema de transporte público de pasajeros de acuerdo a diferentes autores. Posteriormente en la sección 1.2 se presentan las características relevantes de los modos de transporte público de pasajeros. En la sección 1.3 se presentan los diferentes modos de transporte y sus clasificaciones; en las secciones 1.4 y 1.5 se presentan los componentes físicos y características de los sistemas de transporte. En la sección 1.6 se presentan la estructura, características y elementos de una red de transporte público. En la sección 1.7 se presenta el proceso de planificación del transporte urbano. Luego, en la sección 1.8 se presenta el proceso de dimensionamiento de una ruta de transporte. Por último, en la sección 1.9, se presenta una introducción a las definiciones y especificaciones del sistema de transporte público de pasajeros en la Ciudad de México.

### **1.1 Definición de transporte público de pasajeros**

Para Vuchic (2007) el sistema de transporte público provee el servicio de transporte para grupos masivos de personas, el cual tiene sus rutas definidas y programadas las cuales están disponibles para todo usuario que pague una tarifa fija previamente definida. Algunos ejemplos de modos de transporte público son los autobuses, el tren ligero, el taxi, microbuses, el “dial-a-ride” (transporte especial, por ejemplo para personas con movilidad reducida), el Metro, entre otros. Este tipo de transporte también incluye el transporte público de alquiler, el cual ofrece el servicio de transporte a un lugar determinado con un previo contrato, modificable a los deseos del usuario, este tipo especial de transporte público no tiene definidas ni programadas sus rutas.

Un concepto más amplio y concreto lo ofrece Larwin (1999) quien define el transporte público como el movimiento de personas mediante un vehículo disponible para el público en general, usualmente con una tarifa previamente definida; este autor hace la distinción entre dos tipos de transporte público, el “Tránsito” y el “Paratránsito”. El “Tránsito” hace referencia al transporte de pasajeros y de su equipaje, con rutas, paradas, tarifas y programaciones definidas, dentro de esta clasificación se considera los autobuses, el trolebús, los autobuses semirápidos, el tranvía, el tren ligero, el tren rápido y el tren de cercanías. El “Paratránsito” hace referencia al transporte de tipo familiar, transporte de circulación interna como los elevadores, transporte de alquiler como autobuses escolares, taxis, vehículos rentados y el paratránsito público como el “dial-a ride”.

Farris y Harding (1976) conciben el sistema de transporte público como un conjunto de sistemas, cada uno concebido como un todo, conformado por componentes que se integran, interactúan y se adaptan. Los sistemas que conforman el sistema de transporte público son: sistema físico, sistema económico, sistema de precios y el sistema de regulación del transporte

de pasajeros, entre los cuales se presentan relaciones que generan problemas, como de mercado, de transporte urbano, ecológicos, políticos y administrativos.

Según Molinero Molinero y Sánchez Arrellano (1997) el transporte urbano es un sistema simple cuya función repercute directamente sobre la calidad de vida de los habitantes y la eficiencia con la cual se realizan las actividades cotidianas en una ciudad, como trabajo, comercio, entretenimiento, entre otras.

El servicio de transporte público para el caso de la Ciudad de México está considerado como *“la actividad a través de la cual, la Administración Pública satisface las necesidades de transporte de pasajeros o carga, por sí, a través de Entidades, concesionarios o mediante permisos en los casos que establece la Ley y que se ofrece en forma continua, uniforme, regular, permanente e ininterrumpida a persona indeterminada o al público en general, mediante diversos medios”* (Ley de Movilidad, 2014).

Todas las definiciones que se presentaron son complementarias. En conclusión, un sistema de transporte público de pasajeros se puede definir como el organismo que se encarga de la movilidad de las personas y de su equipaje, cuyas rutas y paradas pueden ser o no fijas, y se puede clasificar de acuerdo al tipo de servicio que se brinda.

## **1.2 Características de los modos de transporte público de pasajeros**

Para Vuchic (2007) los modos de transporte están determinados por tres características: Las vías, los sistemas tecnológicos y el tipo de servicio; estas características influyen sobre el costo y el rendimiento de los modos.

### **1.2.1 Las vías**

Larwin (1999) presenta los siguientes conceptos con relación a los espacios por donde se desplazan los vehículos de transporte público de pasajeros:

**1. Vías:** definidas como el terreno usado para el sistema de transporte, éste puede ser compartido, semi-exclusivo y estrictamente exclusivo

**2. Infraestructura:** son los recursos requeridos para la operación del sistema de transporte público, como las instalaciones para distribución de energía, el sistema de control, muros de contención, divisiones de carril, entre otros.

Vuchic (2007) define las vías como el área designada para la circulación de los vehículos; presenta tres categorías, la categoría C, la categoría B y la categoría A, éstas se definen por su separación con respecto a la circulación de otros vehículos. La categoría C hace referencia a las

calles en las cuales transitan diversos sistemas de transporte; pero puede haber preferencias de circulación en determinadas zonas (ver figura 1.1).

La categoría B hace referencia a las vías por donde circulan varios sistemas de transporte. No obstante, se encuentran físicamente delimitadas por barreras o bordes, aunado a que se presentan intersecciones entre los sistemas de transporte, además se presentan cruces de vehículos y peatones (ver figura 1.2).

La categoría A se refiere a las vías de transporte exclusivas para un modo de transporte, entre los ejemplos más comunes, están las estructuras aéreas (puentes) y los túneles (ver figura 1.3).



*Figura 1. 1 Categoría C-Trolebús de la Ciudad de México. Fuente:Tello de Meneses (2010)*

### **1.2.2 Los sistemas tecnológicos**

Para Vuchic (2007) las más importantes características mecánicas de los vehículos de transporte y de sus vías, son las siguientes:

**Soporte:** considerado como el contacto entre la superficie de rodamiento y el vehículo, comúnmente la superficie del vehículo es un neumático de caucho y la superficie de rodamiento es concreto, aunque existen variaciones, como por ejemplo en los trenes, donde la superficie es de acero o existe soporte por levitación magnética.



*Figura 1. 2 Categoría B- Metrobús de la Ciudad de México. Fuente: Gracia (2012)*



*Figura 1. 3 Categoría A- Metro de la Ciudad de México. Fuente: Diario de México (2013)*

**Guía:** generalmente es un sistema lateral que provee control, soporte y adhesión a los modos de transporte; se presentan dos tipos de sistemas: los que se dirigen desde el vehículo mediante un volante (autobuses, trolebús, automóvil) y los que proveen control lateral a través de guías o rieles (metro, tren ligero, tren de cercanías, etc.)

**Propulsión:** sistema que genera tracción o transferencia de fuerzas de aceleración y desaceleración. El sistema incluye una unidad de propulsión y métodos de transferencias de fuerza de tracción; la unidad de propulsión pueden ser motores de combustión de diésel, turbinas de gas, motor de inducción lineal, entre otros.



**Control:** es el sistema de regulación del viaje de uno o de más vehículos. El control más importante es el que se debe ejercer sobre el espacio longitudinal, éste puede ser manual-visual (automóvil), manual-señal (tren ligero), totalmente automático (metro) o combinaciones de estas formas.

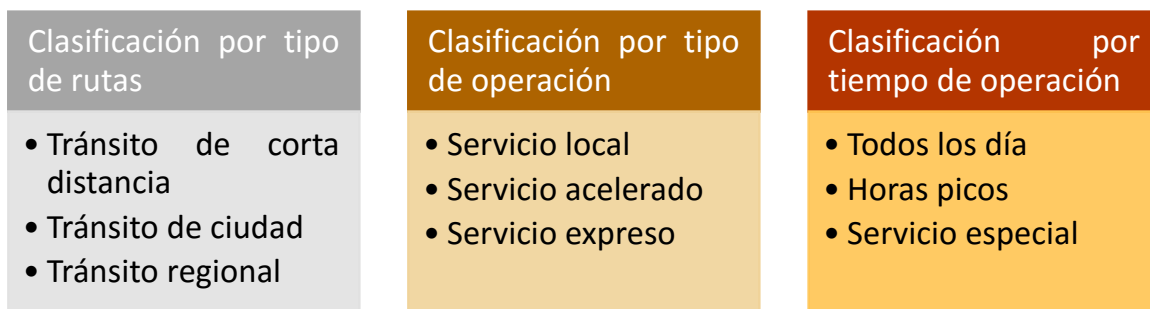
### 1.2.3 Tipos de servicios

Para Vuhic (2007) los tipos de servicio se pueden clasificar por tres características: tipo de ruta y servicio de viaje; tipo de operación y tiempo de operación (*Figura 1.4*).

Dentro de la clasificación por tipo de ruta y servicio de viajes, se encuentra el tránsito de corta distancia, tránsito de ciudad y tránsito regional; el primero se caracteriza por ser un servicio de transporte de baja velocidad entre áreas pequeñas con alta densidad de viajes, como centros de negocio, aeropuertos, entre otros; el tránsito de ciudad se refiere a las rutas de transporte público que circulan en toda la ciudad y su desplazamiento se puede dar en cualquier tipo de vía (A,B o C) y el tránsito regional hace referencia a los servicios de transporte público de pasajeros que se brindan dentro de regiones metropolitanas, éste se caracteriza por ser de alta velocidad y poco número de paradas.

La clasificación por tipo de operación contempla el servicio local, acelerado y expreso; el servicio local hace referencia a todas las unidades de transporte que brindan un servicio de transporte público de pasajeros y se detienen en todas las paradas o según el requerimiento de los pasajeros; el servicio acelerado se refiere a las unidades de transporte público de pasajeros que omite un grupo determinado de paradas, y el servicio expreso el cual se caracterizan por amplios desplazamientos entre paradas.

En cuanto a la clasificación por tiempo de operación, se contemplan los servicios de transporte público de pasajeros que se brindan todos los días, el servicio que se brinda durante horas pico o horas de mayor demanda de transporte y el servicio especial que se brinda durante eventos que generan un incremento excepcional en la demanda del servicio público, como eventos deportivos, celebraciones públicas, condiciones de emergencia, entre otros.



*Figura 1. 4 Tipos de servicio- adaptado de Vuhic (2007)*

Larwin (1999) clasifica los tipos de servicio en seis categorías, quien a diferencia de Vuchic categoriza de una forma más general, por ejemplo, el servicio acelerado está contemplado en el servicio expreso, y además no contempla algunos servicios, tales como el tránsito regional. (ver figura 1.5).

Tránsito local	Servicio Expreso	Servicio básico	Por Despacho (Headway)	Servicio Pico	Servicio Especial
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Opera en calles y vías</li> <li>• Paradas frecuentes</li> <li>• Baja velocidad</li> <li>• Es utilizado en centros de alta actividad y centros de negocios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta velocidad</li> <li>• Amplias distancias entre paradas</li> <li>• Incluye viajes directos y viajes con paradas limitadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rutas que operan todo el día (entre 14 -24 horas de servicio)</li> <li>• Al menos 5 días a la semana</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene lugar en cada Intervalo de tiempo determinado , entre llegadas de vehículos a una estación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Opera durante periodos de alta demanda (horas pico)</li> <li>• El periodo base es entre las horas pico de la mañana y la tarde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rutas irregulares</li> <li>• Opera para eventos especiales o para eventos generadores de tráfico</li> </ul>

Figura 1.5 Tipos de servicio adaptado de Larwin (1999)

Sussman (2006) clasifica el servicio de acuerdo al modo de transporte en tres categorías: la primera en modos de transporte públicos orientados a carreteras, la segunda categoría son los sistemas ferroviarios y la tercera categoría concierne a los servicios intermodales.

Los modos de transporte público orientados a carreteras, contienen tres modos de transporte: el autobús convencional, el paratransito y el servicio en respuesta a la demanda. Al autobús convencional se le atribuye rutas fijas, paradas fijas y una capacidad aproximada de 60 pasajeros, como tecnología se incluye los motores por combustión interna, motores diésel y se incluye también los trolebuses. El paratransito es el modo de transporte que ofrece el servicio de transporte para personas con movilidad reducida, a quienes los recogen en su casa y son transportados a su lugar de destino, este tipo de modo puede tener algunas variaciones en su servicio, como el tener un punto de abordaje y un punto de destino común para un grupo de pasajeros, además puede contener rutas semi-fijas. Este concepto se diferencia del paratransito definido por Vuchic, ya que este último, considera el servicio de transporte para personas con movilidad reducida como paratransito *público*, siendo éste una subdivisión de paratransito. En cuanto al servicio en respuesta a la demanda, se presta cuando se ha solicitado el servicio de transporte por parte del usuario, quien especifica el origen y destino del viaje y un operador es quien programa su viaje, pero además se puede programar el viaje para ser compartido con otros usuarios de forma eficiente, un ejemplo es el servicio UBERPOOL que provee UBER.

En cuanto a la categoría de los sistemas ferroviarios, se incluye el Metro y el ferrocarril suburbano, este último hace referencia a los ferrocarriles que cubren las rutas desde áreas suburbanas hasta los centros de las ciudades.

La última categoría, servicios intermodales, hace alusión a los sistemas de transporte integrados, los cuales hacen uso de diferentes modos de transporte, un ejemplo es el Sistema Integrado de Transporte del Valle de Aburrá SITVA (Colombia), el cual cuenta con los modos de transporte: Metro, BRT(Metroplus), Tranvía, Teleférico (Metrocable) y autobuses (Rutas alimentadoras).

Meyer y Miller (2001) clasifican el servicio de transporte público en tres formas de servicio. El primero como una red de transporte comunitario en el cual se incluye a los autobuses, minibuses, autobuses para personas con movilidad reducida (paratransito), el objetivo es brindar mayor cobertura y accesibilidad al servicio. El segundo servicio de transporte público interurbano, el cual permite el transporte entre ciudades, en esta categoría se incluye el tren, buses interurbanos, entre otros; el tercer servicio es el servicio de transporte para necesidades especiales de la población como el servicio de transporte para estudiantes, población de tercera edad, personas que se encuentren en desventajas económicas, entre otras.

### **1.3 Modos de transporte público de pasajeros**

En esta sección del capítulo se presentan dos clasificaciones de modos de transporte público de pasajeros, la primera realizada por Vuchic (2007) y la segunda por Larwin F. (1999).

#### **1.3.1 Clasificación de modos de transporte público de pasajeros por Vuchic (2007)**

Vuchic (2007) realiza una clasificación de la siguiente manera.

**1. Clasificación por vías de desplazamiento.** De acuerdo a las vías en las cuales se presta el servicio, presenta las siguientes cuatro categorías:

**Transporte de superficie:** son los modos de transporte que operan en las vías con diferentes modos de transporte (vías clase C), su nivel de velocidad es relativamente bajo debido a las paradas que deben hacer para recoger pasajeros. En esta clasificación se sitúan los autobuses, el trolebús y el tranvía. Sin embargo, con respecto al tranvía cabe señalar que éste puede llevar a cabo su operación vías clase B o C, como ejemplos de ello, se puede citar el tranvía de París (Francia) y el de Brest (Francia), respectivamente.

**Transporte semi-rápido:** son los modos de transporte que transitan principalmente en las vías tipo A y B, anteriormente descritas, aunque hay regiones en las que pueden hacer uso de las vías tipo C. Se caracterizan también por su tecnología, por ejemplo, el tren ligero opera en vías ferroviarias y tiene señalización automática, por lo cual se considera más seguro viajar en este tipo de transporte que en los autobuses.

**Transporte rápido:** operan exclusivamente en las vías tipo A, se caracterizan por su alta velocidad, seguridad, capacidad y fiabilidad. Ejemplos de esta categoría son el tren y el monorriel.

**Transporte especial:** existe otra categoría considerada como modos de transporte especiales puesto que no se pueden clasificar según la vía en la cual operan, entre estos modos de transporte están los teleféricos, los funiculares, los metros cables, entre otros.

**2. Clasificación por Capacidad.** Esta clasificación presenta las siguientes categorías:

**Modos de capacidad baja:** operan en vías mixtas, a bajas velocidades y con múltiples interferencias, a esta clasificación se le atribuye el costo más alto. Dentro de esta clasificación se incluye el servicio de taxi, el “Dial-a-Ride” (servicio solicitado por el usuario y programado de tal forma que se ofrezca el servicio a más usuarios simultáneamente) y vans (con capacidad de 5 a 15 asientos y rutas fijas).

**Modos de transporte de capacidad intermedia:** comparten parcialmente las vías con otros tipos de modos de transporte, operan en rutas y horarios fijos, con capacidades que van desde 20 a 35 asientos para minibuses y más de 125 asientos para autobuses articulados. A estos modos se les atribuye que el servicio es menos costoso en comparación a los modos de transporte de baja capacidad, pero menos personalizado. Algunos ejemplos son el autobús común, el trolebús, el tranvía y el servicio de autobús expreso.

**Modo de transporte de alto rendimiento:** esta categoría tiene dos clasificaciones a la vez, el transporte semi-rápido y el transporte rápido. El primero incluye dos tipos de transporte, los autobuses semi-rápidos y el tren ligero. En cuanto a los modos de transporte rápido, éstos poseen infraestructura destinada únicamente para su operación, por lo cual la velocidad de desplazamiento es superior a la de otros modos de transporte, además son modos de transporte seguros y regulados (ejemplo metro, ferrocarril, entre otros).

### **1.3.2 Clasificación de modos de transporte público de pasajeros por Larwin (1999)**

Larwin F. (1999) expresa que comúnmente la única característica para definir los modos de transporte es la tecnología; sin embargo, argumenta que la clasificación puede ser compleja, por ello cita el ejemplo del autobús, el cual puede ser un punto de convergencia de diferentes

clasificaciones de modos de transporte, como la clasificación por vías donde presta su servicio, clasificación por tecnología utilizada y clasificación por servicio brindado. En cuanto a la clasificación por vías, éste puede transitar por cualquier tipo de vía, es decir puede operar en calles con diferentes modos de transporte, también puede operar en espacios reservados para su tránsito o calles estrictamente exclusivas; en cuanto a tecnología, el autobús se puede clasificar como un vehículo con motor de combustión diésel, eléctricos u otros combustibles. Además, el autobús puede también ofrecer diferentes tipos de servicios, como locales, expresos, entre otros. Este autor realiza la clasificación presentada en la figura 1.6 con base en el criterio del espacio donde se ofrece el transporte, siendo ésta una clasificación más general que los ejemplos que menciona.



*Figura 1. 6 Clasificación modos de transporte- adaptado de Larwin (1999)*

#### 1.4 Características de los sistemas de transporte

Según Molinero Molinero y Sánchez Arrellano (1997) las cuatro características que permiten diferenciar y comparar diferentes sistemas de transporte entre sí son Rendimiento o Desempeño del Sistema, Nivel de Servicio, e Impactos y Costos. Considerando como mejor sistema de transporte el que presente la preferible combinación de estas características.

#### **1.4.1 Rendimiento o desempeño del sistema**

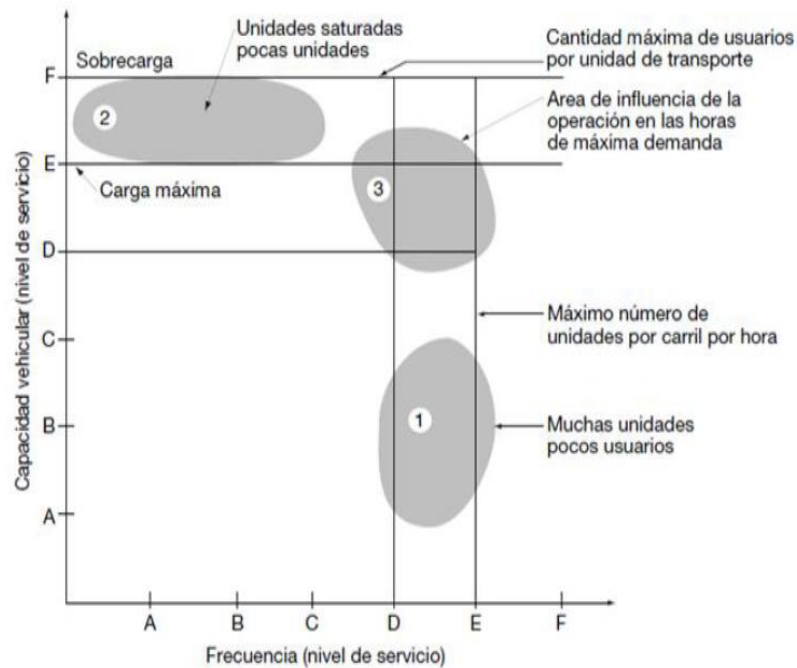
Esta característica representa la forma en la cual se desenvuelve el sistema y se define a través de los siguientes conceptos:

- La cantidad de unidades que prestan el servicio de transporte durante un periodo de tiempo o frecuencia del servicio.
- La velocidad de viajes que experimentan los usuarios a bordo de una unidad o velocidad de operación.
- El porcentaje de llegadas a tiempo dentro de un margen aceptable o confiabilidad del servicio.
- La uniformidad de salidas de las unidades de transporte o regularidad del servicio.
- La seguridad del sistema en función del número de accidentes por año o por kilómetro.
- El número máximo de espacios (capacidad ofrecida) o de usuarios (capacidad utilizada) que las unidades de transporte puedan transportar en un determinado periodo de tiempo.
- El producto de la velocidad de operación y la capacidad de línea.
- La productividad, relaciona la cantidad producida y su unidad de insumo, puede ser vehículos-km entre una unidad de trabajo o una unidad de costo.
- La utilización de un sistema, en el cual se relaciona la producción y el insumo con unidades iguales, puede ser persona-km entre espacio-km.

#### **1.4.2 Nivel de servicio**

Es una medida general que incluye todas las características de operación que afectan al usuario como la velocidad, confiabilidad y seguridad del sistema; adicional a ellos, contempla aspectos que influyen en la calidad del servicio, como: la cobertura adecuada de la red, limpieza y estética de las unidades, itinerarios convenientes y publicados, vehículos adecuados, además de la presencia de servicios rápidos frecuentes y confiables.

El número de pasajeros por unidad de transporte (capacidad vehicular) y el número de vehículos por hora (frecuencia) influyen directamente sobre el nivel de servicio, en la figura 1.7, se idéntica que en el caso 1, hay una alta frecuencia, pero cada unidad transporta pocos pasajeros, por lo que su nivel de servicio es muy alto; en el caso 2, se presenta baja frecuencia y las unidades de transporte sobrecargadas, en este caso hay un nivel de servicio bajo. En el caso 3, se ubica el nivel de servicio para el diseño del transporte público, donde la frecuencia es alta, sin embargo el nivel de carga de las unidades de transporte no supera su máximo.



Transportation Research Board: *Highway Capacity Manual*. Washington, D.C.: NRC Special Report 209, 1985.

**Figura 1. 7 Naturaleza Bidimensional del Problema de Capacidad del Transporte Público- Fuente: Molinero Molinero y Sánchez Arrellano (1997)**

### 1.4.3 Impactos

Los impactos se dividen en dos categorías: de corto y largo plazo. Se consideran impactos de corto plazo la reducción de congestión en las vialidades, cambios en las emisiones de contaminantes, niveles de ruido y estética; en cuanto a impactos de largo plazo son aquellos que promueven cambios en el valor y uso del suelo, cambios en las actividades económicas o urbanas de determinada zona.

### 1.4.4 Costos

La relación costo-efectividad de los diferentes sistemas de transporte puede ser comparada si se expresan los costos totales en términos de pasajeros-kilometro. Se deben considerar los costos de inversión y los costos de operación; los primeros son los que se presentan en la fase de construcción o en la realización de cambios en aspectos físicos del sistema contemplando la vida útil de los vehículos e infraestructura; mientras que los segundos son los costos en que se incurren en la operación diaria del sistema, éstos se ven fuertemente afectados por la variación en salarios, costos de energía y de materiales.

### 1.5 Componentes físicos de los sistemas de transporte

Según Molinero Molinero y Sánchez Arrellano (1997) los principales componentes físicos de un sistema de transporte son los siguientes:

**Vehículos:** son las unidades de transporte, en el caso de autobuses y trolebuses su conjunto se denomina parque vehicular y en el caso del transporte férreo se denomina material rodante

**Infraestructura:** se considera como infraestructuras las vías, paradas, estaciones en las que opera el sistema de transporte, garajes, depósitos, encierros o patios, talleres de mantenimiento y reparación, sistemas de control y sistemas de suministro de energía. El estado de la infraestructura depende de las características de la demanda, el nivel y la calidad del servicio que se quiere ofrecer.

**Red de transporte:** se conforma por las rutas y líneas del sistema de transporte.

### 1.6 Red de transporte público

Según Molinero y Sánchez Arrellano (1997) una red de transporte público se conforma por rutas y líneas. Las líneas son las vialidades por donde circulan una o varias rutas y se considera como ruta al conjunto de las vialidades por donde las unidades de transporte circulan entre dos puntos terminales. Así, se considera que la longitud de ruta puede ser mayor e igual a la longitud de línea, siendo la longitud de ruta la suma de la longitud de todas las rutas y la longitud de línea es la suma total de las longitudes de las vialidades.

#### 1.6.1 Estructura física de las rutas

Hay cinco tipos fundamentales de rutas (Molinero y Sánchez Arrellano 1997):

**Rutas radiales:** conecta las diferentes áreas de la ciudad a un centro de actividades o a un centro histórico, su nivel de ocupación alcanza el máximo en la periferia y desciende a medida que se acerca al centro de actividades. Este tipo de rutas es viable en ciudades menores a 300,000 habitantes, puesto que de lo contrario no se considera las necesidades de viajes en otras áreas diferentes a las mencionadas.

**Rutas diametrales:** es la unión de dos rutas radiales, que atraviesan el centro de actividades y conecta dos extremos de la ciudad. Surgen cuando el sistema de transporte evoluciona y las rutas radiales experimentan niveles elevados de concentración en las terminales. Este tipo de ruta presenta un nivel de ocupación cíclico, alcanza su máximo nivel de ocupación en la trayectoria periferia- centro de actividades, en éste un gran número de pasajeros descienden y en el trayecto centro de actividades- periferia nuevamente alcanza un máximo nivel de ocupación, estos pasajeros se distribuyen en el resto de la trayectoria.



**Rutas tangenciales:** este tipo de ruta pasa a un lado del centro de actividades, y sólo es recomendable en ciudades con alta densidad poblacional, puesto que la utilización de estas rutas es baja.

**Rutas con lazo en su extremo:** este tipo de ruta contiene un lazo en uno de sus extremos, por ende, tiene una sola terminal. Generalmente el lazo recorre zonas de baja densidad poblacional y el recorrido concluye en el centro de actividades de la ciudad, por cuanto es necesario que aborden gran cantidad de usuarios para justificar el recorrido; sin embargo, el lazo también puede estar ubicado en el centro de actividades (cuando éste es muy amplio) y es necesario conectarlo a una zona de alta densidad poblacional.

**Rutas circulares:** en este tipo de rutas no hay terminales, la carga es uniforme en toda la ruta y no se recuperan los tiempos perdidos, un claro ejemplo es la ruta 9 del Sistema de Transporte Interno Pumabús.

Las rutas o líneas de transporte público convergen a troncales, la forma como lo hacen se puede clasificar en rutas alimentadoras o ramales. Los ramales se integran a los troncales sin transbordos, son útiles en corredores donde el volumen de pasajeros es alto y se considera un solo modo de transporte, un ejemplo de este tipo de ruta es la Línea B del Metro de la ciudad de Medellín, la cual se integra a la Línea A en la estación San Antonio.

Las rutas alimentadoras son útiles en corredores de volúmenes bajos y se consideran dos o más medios de transporte, sirven para cubrir el área y transportar al usuario a un punto de transbordo a un medio de transporte de mayor o igual capacidad, como por ejemplo las rutas alimentadoras del Metro de la Ciudad de México, éstas conectan las diferentes zonas a las líneas principales del metro por medio de microbuses.

### 1.6.2 Estructura física de la red

Según Molinero y Sánchez Arrellano (1997) hay cinco tipos de redes que se diferencian por sus características de servicio y operacionales:

**Red ortogonal:** en este tipo de red la región de servicio es amplia y uniforme, aunque las rutas no siempre siguen las líneas de deseo de viajes, por lo que ofrece una gran cantidad de transbordos en sus puntos de intersección. Esta red opera en ciudades con densidad poblacional uniforme y que cuentan con una retícula vial (ver figura 1.8).

**Red radial:** está conformada principalmente por rutas radiales y diametrales; este tipo de red tiende a seguir las líneas de deseo principales hacia un centro de actividades en forma radial con algunas ramificaciones en la periferia o áreas de baja densidad, además puede contener también rutas circunferenciales para viajes puerta a puerta. Dado que la cobertura de área y la intensidad del servicio de una red radial no son uniformes, este tipo de red opera mejor en ciudades con alta concentración de viajes y que presente una red vial radial (ver figura 1.9).



Figura 1. 8 Red de Autobuses de Manhattan-Fuente: NYCMaP360° (2016)



Figura 1. 9 Mapa de la Red Ferroviaria Española- Fuente: Instituto Geografico Nacional (2014)

**Red irregular:** Este tipo de red no sigue ningún esquema geométrico, se da en ciudades con trazos viales irregulares, con barreras topográficas y artificiales (ver figura 1.10).

**Red flexible:** se presenta en respuesta a la demanda de usuarios, y hay tres tipos: muchos a uno, muchos a pocos y muchos a muchos. La primera se utiliza en rutas alimentadoras a rutas radiales principales (muchos orígenes con un atractor final); la segunda opera en áreas que se desean conectar a zonas de baja densidad con puntos atractores (ver figura 1.11); la tercera es utilizable para atender zonas de baja densidad sin puntos atractores (viajes dispersos).

**Red con transferencias coordinadas:** en esta red la distancia entre puntos focales es prácticamente uniforme, su propósito es considerar un esquema operativo que facilite los transbordos y brinde una alta conectividad entre las diferentes rutas.

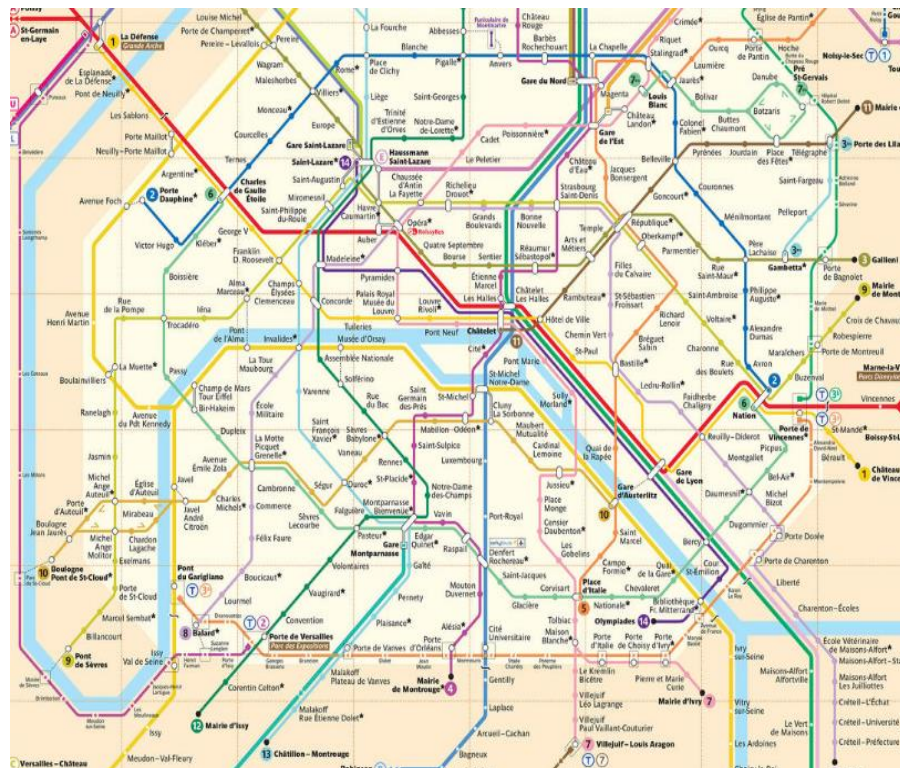


Figura 1. 10 Mapa de la Red del Metro de París (Francia)- Fuente: PlanParis360 (2014)

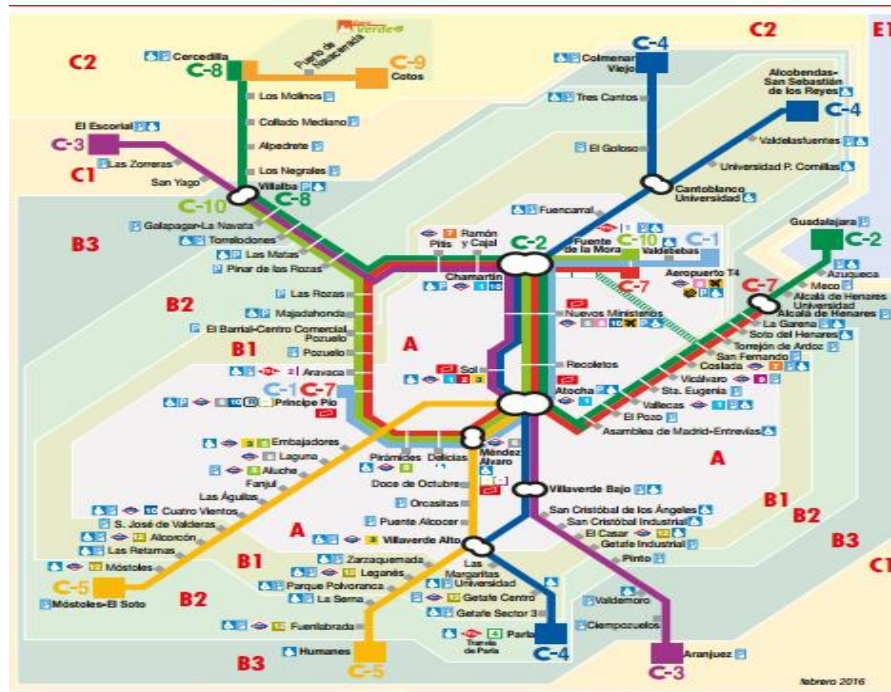


Figura 1. 11 Plano de la Red de Cercanías de Madrid- Fuente: Consorcio Transportes Madrid (2016)

### 1.6.3 Características de una red de transporte

Según Wardrop (1979) y Vuchic (1978) consultado en Molinero y Sánchez Arrellano (1997) el desempeño y eficiencia de una red de transporte puede ser evaluado por las siguientes características:

**Cobertura del área de servicio o cuenca de transporte:** es el porcentaje de población que se abarca dentro de un radio determinado a partir de una estación, generalmente se considera como cuenca primaria la distancia que puede ser recorrida a pie en un lapso de cinco minutos, esto es aproximadamente un radio de 400 metros y como cuenca secundaria se considera la población que se abarca entre cinco y diez minutos a partir de la estación. La cuenca de transporte se ve afectada por las pendientes, por cada 10 metros de diferencia en el nivel del suelo, y la cuenca de servicio se reduce en 100 metros.

**Líneas de deseo:** las líneas de deseo son la representación de las matrices de origen-destino, donde se evidencia las necesidades de viaje de los usuarios. A partir de las líneas de deseo se puede realizar un primer acercamiento al diseño de las rutas; pero, el diseño de rutas debe considerar el balance de demanda en los extremos de cada ruta.

**Sinuosidad de una ruta:** es la relación entre la distancia recorrida por un vehículo entre dos puntos y la distancia lineal entre estos dos puntos. En un caso ideal esta distancia debe tender

a uno, sin embargo, existen factores topográficos, viales, físicos o normativos que no permiten que se dé el caso ideal.

**Conectividad:** es el porcentaje de viajes que se realizan sin transbordos o también se considera como la relación existente entre la longitud de ruta y la longitud de línea, entre mayor sea la longitud de ruta, mayor es el grado de conectividad.

**Densidad del servicio:** determina que tan intensamente está servida un área urbana. Se mide por longitud de línea, de ruta o vehículos-kilometro por hora en el área de servicio. Este indicador está relacionado con la amplitud de la red y la frecuencia del servicio. La amplitud de la red se refiere a la distancia promedio que los usuarios deben caminar para abordar una ruta. Considerando un sistema de transporte público de pasajeros con determinado tamaño de flota, el tiempo de espera es directamente proporcional al número de rutas, dado que entre mayor número de rutas haya, menor es el número de autobuses por ruta, lo que se traduce en menor frecuencia de servicio en cada ruta y por ende, mayor tiempo de espera; mientras que el tiempo de caminata es inversamente proporcional al número de rutas, entre más rutas haya en un área determinada menor es la longitud promedio de caminata. Una red ideal es aquella que tiene los tiempos de espera y de caminata semejantes. Si en determinada red los tiempos de espera son mayores a los tiempos de caminata, se debe reestructurar la red disminuyendo el número de rutas, promoviendo la disminución de los tiempos de espera, si por el contrario el tiempo de caminata es mayor que el tiempo de espera entonces se debe incrementar el número de rutas.

**Transbordos:** la planeación de transbordos está relacionada con el servicio eficiente de una red de transporte; si el sistema de transporte brinda transbordos fáciles, sencillos, rápidos y convenientes el sistema estará operando de forma eficiente y atrayendo la máxima cantidad de usuarios potenciales, si por el contrario el sistema provee transbordos mal ubicados, inseguros y no coordinados, el sistema es ineficiente y se estaría perdiendo gran cantidad de usuarios. El análisis de transbordos considera el intervalo y el tipo de ruta.

Las rutas se clasifican como rutas de intervalo corto o intervalo largo. El primero se considera si el tiempo entre llegada de vehículos es menor e igual a 10 minutos, y el segundo si el tiempo entre llegada de vehículos es mayor a 10 minutos; cuando la transferencia se realiza de una ruta con intervalo corto a otra ruta de intervalo corto, el tiempo de transbordo es corto y no se requiere coordinación entre rutas; si el transbordo se da de una ruta de intervalo largo a una de intervalo corto los tiempos de transbordo también son cortos, si por el contrario se transborda de una ruta de intervalo corto a una ruta de intervalo largo, el usuario necesita información acerca de los horarios de las rutas para que pueda planear su viaje con el menor tiempo de transbordo posible, ahora, si se considera el transbordo de una ruta de intervalo largo a otra igual, el tiempo de transbordo depende de si las rutas son simultaneas, coordinadas o no coordinadas, de igual forma el usuario necesita información para planear su viaje.



En cuanto al tipo de ruta se diferencian si en el lugar del transbordo la ruta termina o es una ruta de paso, y a la vez si el transbordo se da entre rutas similares o entre una ruta de mayor capacidad a una de menor capacidad o viceversa. Dependiendo del caso, cambia el número de permutaciones de transbordo y que tan fácil es buscar la coordinación en entre las rutas.

**Velocidad:** es una de las características más importantes para determinar el nivel de servicio, de igual forma influye directamente en los costos operativos y de forma indirecta sobre la comunidad. El usuario se ve afectado por la velocidad de operación (km/h) entre dos puntos terminales, definida como el cociente entre longitud del derrotero y tiempo de recorrido. La velocidad que afecta al prestador del servicio de transporte es definida como Velocidad Comercial, es el cociente entre la longitud del derrotero, de ida y vuelta y el tiempo total (tiempo de ida y vuelta más el tiempo de terminal), esta velocidad determina el tamaño de flota y por ende los costos operativos.

**Costos de operación:** en éstos se ven fuertemente influencias por el diseño de la red, más concretamente por factores como la longitud de las rutas y sus traslapes, los cuales se deben diseñar de forma que las cargas estén balanceadas a lo largo de la red.

## 1.7 Planificación del transporte urbano de pasajeros

La planificación de un sistema de transporte de pasajeros tiene como finalidad tomar decisiones operativas, estructurales u organizacionales que impacten favorablemente el mayor flujo de personas al menor costo posible, considerando los impactos socioeconómicos y ambientales a los que hay lugar. El proceso de planificación de un sistema de transporte repercute directamente sobre el desarrollo económico de una ciudad y su distribución geográfica, de aquí su importancia y la necesidad de realizar este proceso simultáneamente al proceso de planeación urbana. Un proceso de planeación está conformado por cuatro etapas básicas: diagnóstico, análisis, evaluación e implementación. En la primera etapa se realiza la recolección de la información, la formulación de objetivos y el desarrollo de modelos; en la segunda etapa se definen las alternativas y se prevén los posibles impactos; en la etapa de evaluación se selecciona la mejor alternativa, como resultado de aplicar métodos de evaluación y en la última etapa se realiza el plan de implementación de la mejor alternativa, se debe observar el comportamiento del sistema y reevaluar. En la figura 1.12 se muestra la secuencia de análisis del proceso de planificación de los transportes urbanos propuesto por Molinero y Sánchez Arrellano (1997).

### 1.7.1 Definición de objetivos

Según Molinero y Sánchez Arrellano (1997) en esta etapa se determina el estado deseado del sistema. Los objetivos se clasifican en objetivos de políticas de planeación y objetivos propios

del sistema de transporte. Los objetivos de políticas de planeación se clasifican a la vez en objetivos globales y en objetivos principales, los primeros incluyen a la sociedad en general e intervienen todos los sectores institucionales (ejemplo: mejorar las bases económicas de una ciudad) y los objetivos principales son los objetivos propios de un sector (ejemplo: reducir costos del transporte).

En cuanto a los objetivos propios del sistema de transporte, éstos se clasifican en objetivos intermedios, que son planes de acción (por ejemplo: satisfacer las necesidades de desplazamiento de peatones y ciclistas) y objetivos de los proyectos, que son medidas técnicas o administrativas (verbi gracia, establecer sistemas de tarificación). Cada objetivo que se defina debe ser medible o cuantificable.

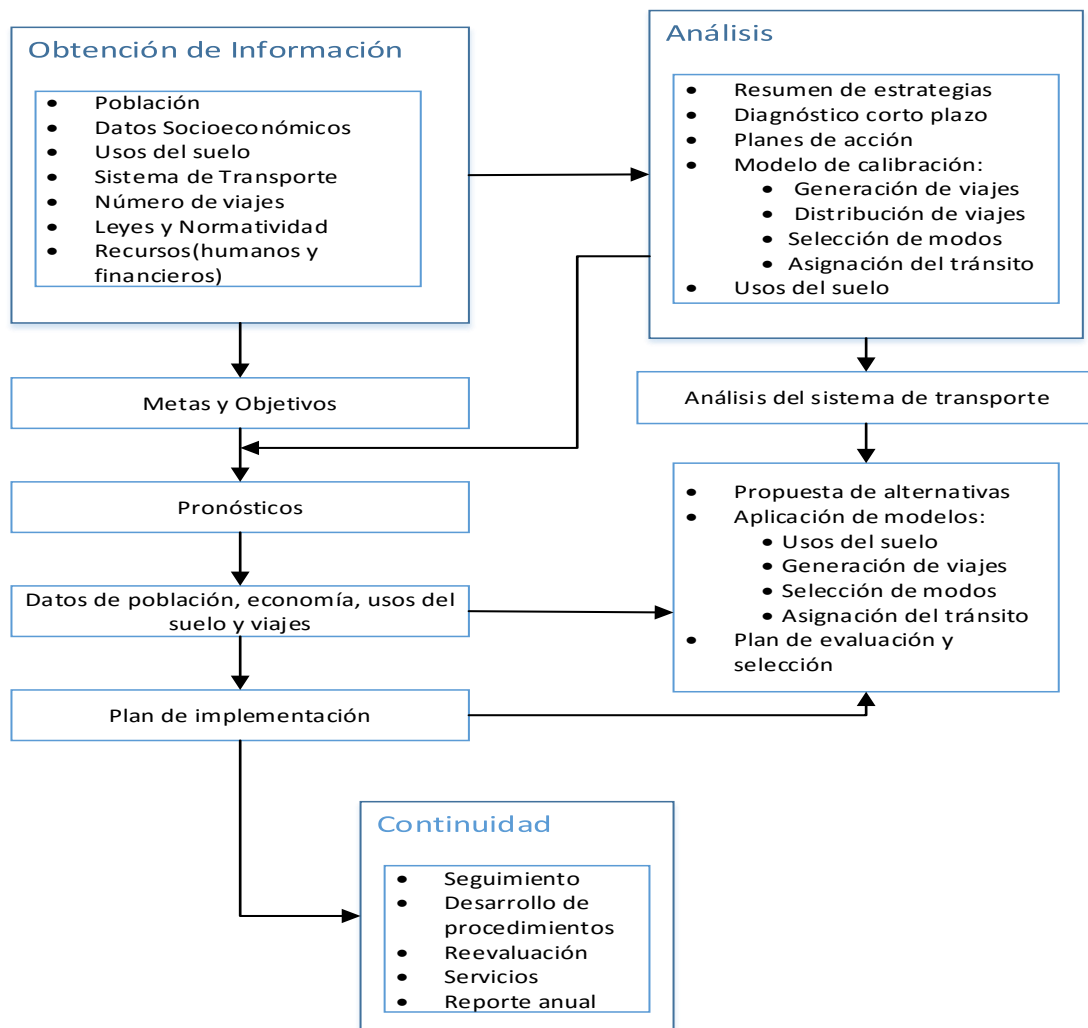


Figura 1. 12 Resumen del Proceso de Planificación de los Transportes Urbanos- Fuente: Molinero Molinero y Sánchez Arrellano (1997)

### **1.7.2 Recolección de Información**

Molinero y Sánchez Arrellano (1997) argumentan que en esta etapa es necesaria para conocer la oferta y la demanda del sistema de transporte, para un posterior diagnóstico de las características y necesidades de transporte en el área de estudio. Además, es necesario conocer datos generales como los siguientes: tendencias en el crecimiento de la población para determinar demandas futuras, planes de desarrollo urbano para identificar centros generadores y atractores de viajes, datos de la infraestructura existente como velocidad de circulación, capacidad, longitud, estado de pavimento, legislación y tipo de administración para identificar problemas administrativos y legales, entre otros.

En esta fase se deben identificar los recursos destinados al transporte de pasajeros (oferta), sus componentes, características y operación. Esta información se realiza por medio de inventarios, estadísticas, encuestas directas con las autoridades o trabajo de campo. La principal información se basa en derroteros y paradas, horarios y tiempo de recorrido, frecuencias en horas de máxima demanda y en horas valle, tarifas, características de vehículos, número de pasajeros transportados (por vehículo, por día o pasajeros-kilometro), recorridos por vehículo (vehículo-kilometro), personal en la empresa, ingresos, gastos e inversiones.

Además, es necesario identificar la demanda cubierta por el sistema y la demanda potencial, para esto es necesario identificar características individuales de los usuarios y de los desplazamientos. Por características individuales de los usuarios se entiende el lugar de residencia, su nivel socioeconómico, la tasa de motorización, edad y sexo. Ahora bien, como características de los desplazamientos se entiende, los orígenes y destinos, motivos, horario y duración del viaje. La predicción de la demanda es de vital importancia, puesto que una sobredimensión de ésta implicaría obras de infraestructura sobredimensionadas y en caso contrario, provocaría una insuficiencia en la oferta y retraso en el proceso de urbanización. La predicción de la demanda se puede realizar de forma proporcional al crecimiento de la población, de acuerdo al nivel de motorización de los individuos o por medio de una comparación con otras ciudades con similitudes en el nivel de vida y movilidad.

### **1.7.3 Modelación**

Molinero y Sánchez Arrellano (1997) mencionan que a partir de la información obtenida, mediante modelos se puede realizar análisis acerca de las decisiones de los usuarios al realizar el viaje (figura 1.13). En esta etapa se realizan los siguientes diagnósticos: 1. patrones de atracción o generación de viajes, 2. distribución espacial de los viajes, 3. proporción de viajes por modo de transporte y 4. patrones de selección de ruta (itinerario a seguir). Esta es la secuencia tradicional de modelación de un sistema de transporte, pero no se garantiza que sea el proceso que siguen los usuarios para realizar un viaje, existen además modelos que combinan

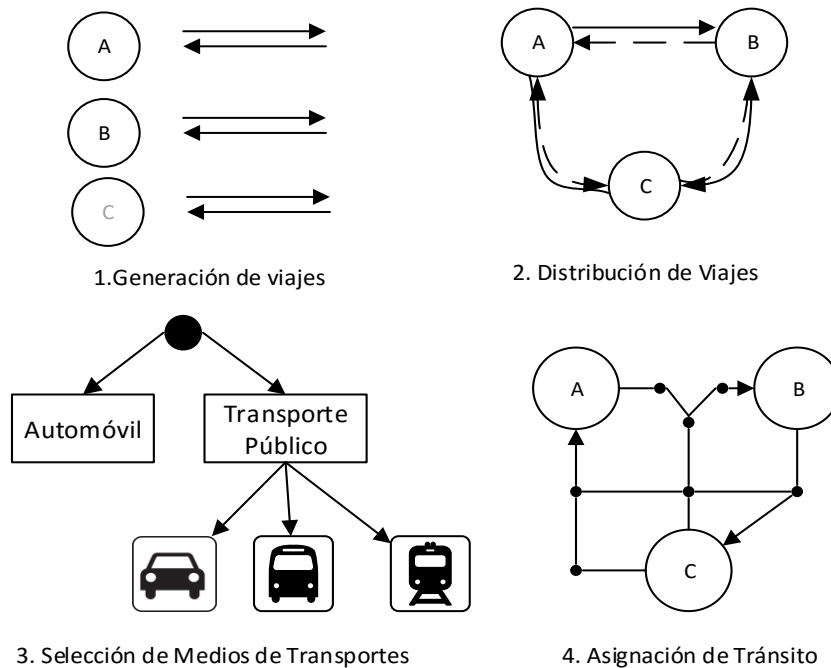


varias de las etapas de este proceso, sin embargo, esta tesis se desarrollará con base en la secuencia planteada.

**Modelos de generación o atracción de viajes:** estos modelos buscan relacionar las actividades urbanas con los viajes, para ello, es necesario identificar características propias de determinada zona que tengan impacto significativo en la generación o atracción de viajes. Generalmente el número de viajes está relacionado con características socioeconómicas o usos del suelo. Estos modelos se dividen en dos tipos: modelos agregados (primera generación, años 40's) y en modelos desagregados (segunda generación, años 70's).

Los modelos agregados son los que relacionan el número de viajes de una zona en particular con un grupo de variables independientes, tales como la población, el nivel socioeconómico, el número de hogares o familias, el número de vehículos, entre otras.

Los modelos desagregados relacionan el número de viajes atraídos o generados en cierto domicilio con las características de los hogares como personas que habitan en el hogar, número de automóviles, nivel de ingresos familiares, entre otros. Este tipo de modelos requiere mayores tamaños de muestra que los modelos agregados pero menores observaciones por variables. En esta categoría se ubican: análisis de categorías, análisis de clasificación múltiple y el análisis de regresión múltiple.



**Figura 1. 13 Esquemas del Método de las Cuatro Fases en la Planificación de los Transportes- Fuente: Molinero Molinero y Sánchez Arrellano (1997)**

**Modelos de distribución de viajes:** en esta etapa se determina el flujo de viajes entre cada par origen-destino. Los modelos más utilizados son los modelos de factor de crecimiento y los modelos gravitacionales.

**Los modelos de factor de crecimiento** extrapolan la situación inicial por medio de factores de crecimiento, como, el método del factor uniforme, método del factor promedio, método de Detroit y el método de Furness. Estos modelos tienen como ventaja la simplicidad de sus cálculos y como desventaja, la falta de sensibilidad a cambios que se pueden presentar en la oferta del transporte.

Respecto a **los modelos gravitacionales**, se basan sobre la oferta del transporte. Además, relacionan la demanda de viajes entre zonas con la separación, costo o impedancia entre zonas. A continuación, se presenta algunas formulaciones,

- **Formulación simple**

$$T_{ij} = \frac{\alpha * P_i * P_j}{d_{ij}^2} \quad (1.1)$$

Donde:

$T_{ij}$ : número de viajes entre i y j

$P_i$  : población origen

$P_j$  : población destino

$d_{ij}$  : distancia entre la zona i y la zona j

$\alpha$ : factor de asignación.

$\alpha$  puede ser reemplazado por dos factores de balanceo  $A_i$  y  $B_j$ , los cuales son obtenidos mediante el método iterativo de solución para el modelo clásico de gravedad doblemente acotado.

- **Formulación compleja**

Al modelo se le realizaron algunas mejoras, como por ejemplo utilizar el número de viajes atraídos o generados por cada zona, calibración de la potencia y variaciones en la función de impedancia.

$$T_{ij} = P_i * \left[ \frac{\frac{A_j}{d_{ij}^n}}{\sum_{j=1}^n \frac{A_j}{d_{ij}^n}} \right] \quad (1.2)$$

$T_{ij}$ : número de viajes entre i y j

$P_i$ : número de viajes producidos o generados en i

$A_i$ : número de viajes atraídos por la zona j

$d_{ij}$ : impedancia para unir los sectores i y j

- **En función de una potencia**

$$T_{ij} = k * \left[ \frac{a_i b_j}{d_{ij}^\beta} \right] \quad (1.3)$$

$T_{ij}$ : número de viajes entre i y j

$a_i$ : número de viajes generados en i

$b_j$ : número de viajes atraídos por la zona j

$k$ : factor de ajuste

$\beta$ : parámetro a calibrar ( $1.5 < \beta < 3$ )

$d_{ij}$ : impedancia para unir los sectores i y j

- **Con base en una función de disuasión**

$$T_{ij} = \alpha * O_i * D_j * f(C_{ij}) = A_i * O_i * B_j * D_j * f(C_{ij}) \quad (1.4)$$

$T_{ij}$ : número de viajes entre i y j

$O_i$ : total de viajes generados en la zona i

$D_j$ : total de viajes atraídos en la zona j

$\alpha$ : factor de asignación

$A_i$ : factor de balanceo (puede obtenerse mediante el método iterativo de solución para el modelo clásico de gravedad doblemente acotado)

$B_j$ : factor de balanceo (puede obtenerse mediante el método iterativo de solución para el modelo clásico de gravedad doblemente acotado)

$F(C_{ij})$ : función de impedancia entre la zona i y la zona j, esta función puede ser,

exponencial:  $F(C_{ij}) = \exp(-\beta * C_{ij})$  (1.5)

potencia:  $F(C_{ij}) = C_{ij}^{-n}$  (1.6)

$$\text{combinada: } F(C_{ij}) = C_{ij}^n \exp(-\beta * C_{ij}) \quad (1.7)$$

Donde  $\beta$  es el multiplicador de Lagrange y es un parámetro a calibrar, su calibración generalmente se hace mediante el método de Heyman

Entre las desventajas que presentan estos modelos está la gran cantidad de tiempo que demandan, por cuanto requieren un gran número de iteraciones para encontrar convergencia y su principal crítica es que son un modelo análogo a la ley de Newton que no explica el comportamiento real de los usuarios.

**Modelos de Selección de Modos de Transporte:** en esta etapa se identifican los volúmenes de viajes entre cada par de origen-destino por cada modo de transporte. La selección del modo de transporte se ve afectada por características del desplazamiento (motivo, destino, periodo, etc.), el usuario (nivel socioeconómico, tenencia de automóvil, etc.) y del sistema de transporte (costos, comodidad, disponibilidad, etc.). Entre los métodos más utilizados están los métodos Logit, éstos buscan la relación entre una variable dependiente Y (volumen por modo de transporte) y una o más variables independientes X (características de desplazamiento, usuario o sistema de transporte). Estos modelos consideran el problema de máxima entropía para generar modelos de distribución y selección modal simultáneamente. La solución al problema se muestra en la ecuación (1.8).

$$P_{ij}^1 = \frac{T_{ij}^1}{T_{ij}} = \frac{\exp(-\beta * C_{ij}^1)}{\exp(-\beta * C_{ij}^2) + \exp(-\beta * C_{ij}^1)} \quad (1.8)$$

Donde:

$P_{ij}^1$ : es la proporción de viajes de i a j por el modo 1

$\beta$ : parámetro a calibrar, generalmente su calibración se hace mediante el método de máxima verosimilitud u observaciones repetidas.

$C_{ij}^k$ : costo, tiempo o distancia de viaje de i a j, por el modo de transporte k.

En un caso más general, el modelo Logit Multinomial (ecuación 1.9) se utiliza para k modos de transporte

$$P_{ij}^k = \frac{\exp(-\beta * C_{ij}^k)}{\sum_k \exp(-\beta * C_{ij}^k)} \quad (1.9)$$

**Asignación de “tránsito” o transporte público:** esta etapa permite asignar los viajes a cada una de las rutas mediante criterios como el tiempo de viaje, distancia recorrida, tipo de vialidad, cantidad de semáforos, aspectos ambientales u otros obstáculos. Los resultados de este estudio son medidas agregadas del rendimiento de la red de transporte (vehículos-km, vehículos-hora,

demora total), establecer tiempos de viaje para cada par origen-destino y cada medio de transporte, estimar volúmenes en cada arco o tramo de la red, determinar rutas y analizar qué pares origen-destino usan un arco en particular, estimar movimientos en intersecciones a futuro (existentes o no). Entre los principales modelos de asignación de tránsito están el método de menor costo y los métodos que toman en cuenta la saturación de las vías. El objetivo de esta etapa es reconstruir la red de forma que satisfaga la demanda, en el capítulo 4 se aborda este tema más a fondo.

#### **1.7.4 Evaluación y seguimiento**

Una evaluación se recomienda cuando se han realizado cambios importantes en la infraestructura del sistema y es necesario una retroalimentación para la operación u obtener información sobre los principales efectos de los cambios. Los criterios de evaluación son los elementos que permiten medir el grado de cumplimiento de los objetivos, es decir indicadores de eficacia o de eficiencia de los proyectos, como volúmenes de tránsito, accesibilidad, costos, ocupación por vehículo, capacidad y nivel de servicio, transbordos, emisiones contaminantes, entre otros. Cuando se requiere un tipo de evaluación más rigurosa se acude comúnmente a métodos unicriterio como la relación beneficio/costo, sin embargo, en este tipo de evaluación no se identifican factores como ahorro del tiempo, incremento en la seguridad, el confort, la movilidad, ni tampoco, hace diferencia entre preferencias de la comunidad y grupos sociales, para este tipo de evaluación más compleja se puede hacer uso de los métodos de evaluación multicriterio.

### **1.8 Dimensionamiento de una ruta de transporte**

El dimensionamiento de una ruta es importante, ya que permite determinar el tamaño de la flota y las características operativas de las rutas para alcanzar los niveles de servicio deseado, además de cubrir la demanda y garantizar la rentabilidad del sistema, así pues, este procedimiento tiene por objetivo lograr el equilibrio entre la oferta y la demanda. A continuación, se describen los parámetros básicos y criterios relevantes para el dimensionamiento de ruta propuesto por Molinero Molinero y Sánchez Arrellano (1997), cabe mencionar que el procedimiento a describir sólo aplica para dimensionamiento de corredores con servicio de terminal a terminal y con flota homogénea.

#### **Parámetros básicos:**

**Intervalo mínimo (*i* en minutos):** es el tiempo que transcurre entre dos salidas sucesivas de vehículos de transporte público en una ruta. Por parte del usuario se espera que este tiempo sea el menor posible; pero, por parte del transportista se busca minimizar los costos de operación relacionados con el tipo de vehículo, por ejemplo, a determinado volumen de

pasajeros es más barato operar menor número de vehículos de mayor capacidad que un número mayor de vehículos pequeños. Este intervalo de tiempo debe buscar un equilibrio entre los dos criterios (usuario y transportista).

**Frecuencia de servicio ( $f$  en horas):** es el número de vehículos de determinada ruta que pasan por un punto dado durante una hora. Ésta es el inverso del intervalo de paso.

$$f = \frac{60}{i} \quad (1.10)$$

La frecuencia máxima de llegadas de vehículos ( $f_{max}$ ) se determina por el intervalo mínimo.

**Capacidad vehicular ( $C_v$ ):** es el número total de espacios en el vehículo, incluye el total de asientos como la capacidad de pasajeros que pueden ir de pie.

**Volumen de pasajeros:** es el número de pasajeros que pasan por un punto dado durante una hora. Éste varía entre horas, días y épocas del año.

**Sección de máxima demanda:** es el tramo o punto de la ruta donde ocurre la máxima demanda de pasajeros a bordo de las unidades y establece el volumen de diseño de la ruta.

**Volumen de diseño (P):** es el volumen que se presenta en la sección de máxima demanda de una ruta. Este volumen es el parámetro que determina la capacidad de línea que debe ofrecerse.

**Capacidad de línea ofrecida:** es la capacidad total que ofrece una línea en un tramo determinado durante una hora, esta capacidad es el producto entre la frecuencia y la capacidad vehicular de la ruta. Se debe proveer una capacidad igual o superior al volumen de diseño.

$$C = f * C_v \quad (1.11)$$

**Capacidad de línea máxima:** es el número máximo de pasajeros por hora que una línea puede llevar con el intervalo mínimo posible. Este parámetro se obtiene como el producto de la frecuencia máxima y la capacidad del vehículo.

$$C_{max} = f_{max} * C_v = \frac{60 * C_v}{i_{min}} \quad (1.12)$$

**Tiempo de recorrido ( $t_r$ ):** es el intervalo de tiempo programado entre la salida de un vehículo de una terminal y su llegada a la terminal opuesta en una ruta, o a la misma terminal de partida.

**Tiempo de terminal:** es el tiempo adicional al tiempo requerido para el ascenso y descenso de pasajeros del vehículo en una terminal. Este tiempo adicional es empleado para dar vuelta al vehículo, realizar un cambio de cabina, para dar un descanso al operador o para permitir los ajustes necesarios en el horario. Permite además de las consideraciones anteriores, mantener

un intervalo uniforme y/o recuperar las demoras en las que se ha incurrido, el tiempo de recuperación de demoras está determinado por el tiempo que la unidad estuvo en funcionamiento.

**Velocidad de operación ( $V_o$ ):** es la velocidad promedio de una unidad de transporte. Se calcula como la relación entre la longitud de la ruta en un sentido (L) en kilómetros y el tiempo que tarda la unidad en recorrer dicha longitud (incluyendo el tiempo de parada en estaciones o paradas y las demoras esperadas por razones de tránsito), en minutos:

$$V_o = \frac{60 * L}{t_r} \quad (1.13)$$

**Tiempo de ciclo ( $t_c$  en min):** es el tiempo total de viaje redondo de una unidad de transporte, es decir, el tiempo que tarda en volver a pasar la misma unidad en determinado punto. En el caso que los tiempos de recorrido y de terminal sean iguales en cada dirección del recorrido, el tiempo de ciclo está dado por,

$$t_c = 2(t_r + t_t) \quad (1.14)$$

De lo contrario

$$t_c = t_{tA} + t_{AB} + t_{tB} + t_{BA} \quad (1.15)$$

Donde:

$t_{tA}$ : tiempo de terminal en A

$t_{AB}$ : tiempo de recorrido entre A y B

$t_{tB}$ : tiempo de terminal en B

$t_{BA}$ : tiempo de recorrido de B a A

**Velocidad comercial ( $V_c$ ):** es la velocidad promedio (en km/h) que una unidad de transporte mantiene para dar una vuelta completa. Esta velocidad está determinada por:

$$V_c = \frac{60 * L}{t_c} \quad (1.16)$$

La velocidad comercial determina directamente (junto con el intervalo) el tamaño del parque vehicular y los costos de operación. La velocidad comercial siempre será menor que la velocidad de operación ( $V_c < V_o$ ), ya que la primera incluye los tiempos terminales y la segunda sólo contempla el tiempo de recorrido.

**Tamaño del parque vehicular:** es el número total de unidades que operan en una ruta y la suma de éstas representa el parque total con que cuenta la empresa de transporte. Está conformado

por el número de vehículos requeridos para prestar servicio en la hora de máxima demanda en todas las rutas ( $N$ ), los vehículos en reserva ( $N_r$ ) y los vehículos que están en mantenimiento y reparación ( $N_m$ ).

$$N_p = N + N_r + N_m \quad (1.17)$$

Alaceda (1997) sugiere que el número de vehículos de reserva y en mantenimiento deben ser el 5% y el 10% del número de vehículos requeridos para prestar servicio en todas las rutas ( $N$ ) respectivamente, el primer porcentaje incluye un 1% para contingencias y el 4% para variación en la demanda y el segundo porcentaje, se divide en un 5% para vehículos en reparación y 5% para vehículos en mantenimiento, así:

$$N_p = 1.15 * N \quad (1.18)$$

**Criterios relevantes:** Estos parámetros dependen del factor de ocupación del vehículo.

**Factor de ocupación ( $\alpha$ ):** es el cociente del número de pasajeros en un vehículo entre la capacidad del vehículo. Este factor está relacionado con el nivel de comodidad del usuario y los costos de operación. Un número  $\alpha$  alto influye en que haya gran cantidad de pasajeros de pie y sobrecarga del vehículo, a la vez implica que se debe utilizar menor número de vehículos, por ende, disminuye los costos de operación. Al haber menos vehículos en servicio los tiempos de espera de los usuarios son mayores, como también los tiempos de ascenso y descenso de pasajeros, por lo que la velocidad de operación se ve afectada y por ende los costos operativos. La determinación del factor de ocupación debe ser un punto de equilibrio entre nivel de servicio, tiempos de espera, tiempos de ascenso y descenso y costos de operación. Generalmente se utiliza un factor alto para horas de máxima demanda (0.9) y un factor bajo para horas valle (un poco mayor al cociente entre el número de asientos del vehículo y la capacidad total del vehículo).

**Intervalo de operación:**  $i = \frac{60 * \alpha * C_v}{P}$  (1.19)

**Frecuencia de operación ( $f$  en horas):**  $f = \frac{P}{\alpha * C_v}$  (1.20)

**Tamaño vehicular de ruta:** es el entero superior de  $N = \frac{t_c}{i}$  (1.21)

**Proceso del dimensionamiento de ruta:**

1. Cálculo de la velocidad de operación para horas pico y horas valle
2. Cálculo del intervalo de operación ( $i$ )
3. Cálculo del tiempo de ciclo ( $t_c$ )
4. Determinación del tamaño vehicular de la ruta ( $N = \frac{t_c}{i}$ )
5. Recalcular el tiempo de ciclo  $t_c = N * i$



6. Recalcular el tiempo de terminal  $t_t = \frac{t_c - 2 * t_r}{2}$
7. Cálculo de la velocidad comercial  $V_c = \frac{60 * L}{t_c}$  para la hora de máxima demanda y la hora valle.

Este procedimiento se utilizará en el capítulo 4 como parte del análisis del estado actual del sistema de transporte interno Pumabús.

### 1.9 Transporte público en la Ciudad de México

En esta sección se presenta la información relevante con relación al reglamento que rige el transporte público de pasajeros en la Ciudad de México.

De acuerdo a la Ley de Movilidad (2014), el Servicio de Transporte Público de Pasajeros se clasifica en: masivo, colectivo, individual y ciclotaxis. Sin embargo, la ley mencionada tan sólo provee formalmente el concepto de ciclotaxi y por su parte El Reglamento de Transporte del Distrito Federal (2015) tampoco provee definición alguna sobre las clasificaciones mencionadas. No obstante, a continuación se presentan algunas definiciones realizadas por otras fuentes.

El transporte público masivo hace referencia a los modos de transporte urbano que utilizan vehículos con gran capacidad de transporte de pasajeros y alta velocidad de desplazamiento, estos sistemas cuentan con facilidades de acceso a los vehículos, con horarios, corredores y paradas establecidas. Dentro de esta clasificación se contempla el BRT (Bus Rapid Transit), el tranvía, el Metro y los trenes suburbanos (Wright y Fjelltrom, 2004). Según el Reglamento de Transporte del Distrito Federal (2003) *“el servicio de transporte público de pasajeros puede prestarse mediante el Tren Urbano de Pasajeros “Metro”, Tren Ligero de Pasajeros, Corredores de Transporte y otros que la secretaría determine”*.

El transporte público colectivo hace referencia a los autobuses que se desplazan por vías regulares. Según el Reglamento de Transporte del Distrito Federal (2003) el servicio público de transporte colectivo de pasajeros se divide en las siguientes categorías:

- Servicio ordinario, el cual se brinda en una ruta específica que incluye todas las zonas de ascenso y descenso autorizadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- Servicio directo, el cual se brinda en una ruta específica, donde el ascenso de los usuarios es el origen y el descenso el destino de la ruta.
- Servicio Exprés el cual se da en una ruta específica, con distancia mínima de 1.5 kilómetros entre paradas.
- Servicio extraordinario, es el cual que por su tecnología, calidad y operación del servicio es superior respecto de los anteriores.

El ciclotaxi según la Ley de Movilidad (2014) se define como: *“Vehículo de propulsión humana a pedales que puede contar con motor eléctrico para asistir su tracción con el propósito de brindar el servicio de transporte público de individual de pasajeros, constituido como una estructura que cuenta con asientos para el conductor y pasajeros y que podrá contar con remolque”*. Además, concibe los ciclotaxis como un complemento a los diferentes modos de transporte de pasajeros.

En cuanto al transporte público individual, la Ley de Movilidad (2014) establece que el taxi y el Sistema de Transporte Individual en Bicicleta Pública están destinados para proveer este servicio.

### **1.9.1 Transporte público concesionado**

La Ley de Movilidad (2014) define la concesión como *“el acto administrativo por virtud del cual la secretaría confiere a una persona física o moral la prestación temporal del servicio de transporte público de pasajeros o de carga, mediante la utilización de bienes del dominio público o privado del Distrito Federal”*. También, La Ley de Movilidad (2014) clasifica el servicio de transporte concesionado en Corredores, Colectivo, Individual, Metropolitano y Carga; los tres primeros corresponden al servicio de transporte público de pasajeros y los dos restantes al transporte de carga. En la ley mencionada, el corredor de transporte se define como *“transporte público de pasajeros colectivo, con operación regulada, controlada y con un recaudo centralizado, que opera de manera preferencial o exclusiva en una vialidad, total o parcialmente confinados, que cuenta con paradas predeterminadas y con una infraestructura para el ascenso y descenso de pasajeros, terminales en su origen y destino, con una organización para la prestación del servicio con personas morales”*.

El Reglamento de Transporte del Distrito Federal (2003) define el transporte colectivo concesionado como *servicio de transporte público de alta capacidad que opera en una vialidad primaria* y lo clasifica en *“Líneas de Metrobús”* y *“Corredor Concesionado”*.

Según López Olvera (2007) el transporte público concesionado en Ciudad de México se conforma por microbuses, autobuses, combis y taxis.

**Autobús:** Sussman (2006) define el modo de transporte de autobús como el servicio que opera en rutas fijas con paradas definidas, posee una capacidad aproximadamente para 60 pasajeros y su tecnología incluye motores de combustión interna, motores diésel y eléctricos.

Koski (1992) define tres tipos de autobuses, éstos son: el autobús estándar, los minibuses y autobuses de alta capacidad. El autobús estándar tiene una longitud entre los 11 metros (capacidad entre 40 a 45 asientos) y 12 metros (capacidad entre 47 a 53 asientos) y un ancho de 2.4 metros o 2.6 metros. En cuanto a las medidas de los minibuses argumenta que son variables, sin embargo, Vuchic (2007) afirma que los minibuses tienen una longitud entre los 5

y los 7 metros, entre 12 y 20 asientos y una capacidad total de 20 a 35 pasajeros y su máxima velocidad oscila entre los 40 y los 70 kilómetros por hora. En cuanto a los autobuses de alta capacidad, Koski (1992) establece que hay dos tipos de autobuses, los autobuses de dos pisos y los autobuses articulados, comúnmente los buses de dos pisos cuentan con 82 asientos (en U.S.A) y los autobuses articulados entre 66 a 72 asientos con una longitud de 15 a 18 metros.

La Secretaría de Movilidad del Distrito Federal como encargada de promover acciones en pro de las mejoras del servicio de transporte público de pasajeros estableció los manuales técnicos de seguridad, accesibilidad, comodidad y fabricación de autobuses nuevos para prestar el servicio público de transporte de pasajeros en el Distrito Federal que rigen a partir del año 2014, las especificaciones técnica promueven que los servicios de transporte público de pasajeros estén al alcance de personas con movilidad reducida y discapacidades, generen menos contaminación atmosférica, cumplan con estándares mínimos de seguridad, comodidad y eficiencia ( GDF 2014b). De la figura 1.14 a 1.18 se presenta algunas de las especificaciones técnicas más importantes que deben cumplir los autobuses del sistema de transporte público de pasajeros en la Ciudad de México.

**Metrobús (BRT)** inició sus operaciones en junio del 2005, como un organismo público descentralizado con personalidad jurídica, patrimonio propio y autonomía técnica y administrativa, tiene por objeto la planeación, administración y control del Sistema de Corredores de Transporte Público de Pasajeros del Distrito Federal: Metrobús (“Metrobús,” 2014).

Navas Quintero (2008) afirma que un sistema de Bus Rapid Transit (BRT), se caracteriza por la utilización de buses de alta capacidad, utilización de tecnologías limpias, estaciones fijas y su desplazamiento tiene lugar en vías exclusivas o parcialmente exclusivas, además cuenta con herramientas tecnológicas que permiten monitorear el funcionamiento del sistema y realizar el pago del servicio de forma electrónica.

Gutiérrez (2012) establece que las características de un BRT son:

- carriles exclusivos, buses de alta capacidad, tanto articulados como bi-articulados
- estaciones cerradas con sistema de prepago
- sistema de control centralizado
- sistemas de pago con tarjeta inteligente
- sistemas de información para el usuario
- fuerte imagen distintiva

Estos sistemas han sido implementados en ciudades como Quito (Ecuador), Guayaquil (Ecuador), Medellín (Colombia), Bogotá (Colombia), Cali (Colombia), Curitiba (Brasil), Lima (Perú), entre otras.

### **1.9.2 Transporte público no concesionado**

Los modos de transporte no concesionados son los que proporciona el gobierno. Según López Olvera (2007) el transporte público del Gobierno Distrital se conforma por el Sistema de Transporte Colectivo Metro, El Servicio de Transportes Eléctricos de la Ciudad de México (STE) y la Red de Transporte de Pasajeros (RTP).

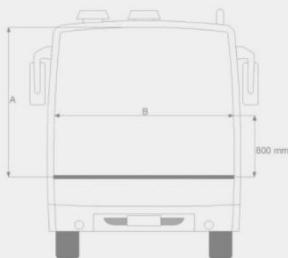
**El Sistema de Transporte Colectivo 'Metro'** fue inaugurado en el año 1969, dando paso a la modernización de la Ciudad de México. Es un organismo público descentralizado con personalidad jurídica y patrimonios propios, con el objetivo de transportar diariamente a los usuarios brindando seguridad y servicio de calidad, mediante tren rápido, movido por energía eléctrica, con recorrido subterráneo y superficial. En la actualidad cuenta con 14 líneas y un parque vehicular de 390 trenes, de los cuales, 321 de rodadura neumática y 69 de rodadura férrea. ("Sistema de Transporte Colectivo Metro," 2015)

**El Servicio de Transportes Eléctricos de la Ciudad de México (STE)** es un organismo público descentralizado, que se encarga de operar el Tren Ligero y las líneas de trolebuses de la Ciudad de México. El Tren Ligero opera en el sur de la referenciada ciudad y presta un servicio de transporte no contaminante a la población de las Delegaciones Coyoacán, Tlalpan y Xochimilco, además que cuenta con 16 estaciones, 2 terminales y 20 trenes dobles acoplados con doble cabina de mando con capacidad máxima de 374 pasajeros por unidad. La Red del Servicio de Trolebús cuenta con 8 líneas en servicio con una longitud de operación de 203.64 kilómetros, incluye los Corredores Cero Emisiones "Eje Central", Eje 2 - 2A Sur y el nuevo Corredor Cero Emisiones Bus - Bici "Eje 7 - 7A Sur". La flota vehicular programada es de 290 trolebuses, los cuales operan a un intervalo de paso promedio de 4.0 minutos, dentro del Distrito Federal ("El Servicio de Transportes Eléctricos del Distrito Federal (STE)," 2015).

**La Red de Transporte de Pasajeros (RTP)** inició su operación en el año 2000 como un organismo público descentralizado administrado por el gobierno del Distrito Federal, con personalidad jurídica y patrimonio propio. Ofrece el servicio de autobuses urbanos en 94 rutas, divididas en siete módulos operativos. Su red de operación es de 3,185 kilómetros de longitud, en las 16 Delegaciones de la Ciudad de México. y cuenta con un parque vehicular aproximado de 1,268 unidades. Ofrece conexiones con 127 estaciones de las 175 del Metro, con 14 estaciones de Metrobús, 5 estaciones del Tren Ligero y 5 paradas del Corredor Cero Emisiones. Entre sus servicios más destacados está el servicio gratuito y diseño especial para población con discapacidad, el servicio ATENEA que garantiza traslados libres de violencia sexual, el servicio NocheBUS que brinda el servicio de transporte público nocturno, seguro y económico, cuenta con once rutas de transporte público que operan de 00:00 a las 05:00 horas, los siete días de la semana, durante todo el año ("Red de Transporte de Pasajeros del Distrito Federal," 2015).

# Pesos y dimensiones

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	AUTOBÚS PISO ALTO								AUTOBUS ENTRADA BAJA			
		CORTO				MEDIANO		LARGO		CORTO		LARGO	
		MOTOR TRASERO**		MOTOR DELANTERO**				MOTOR TRASERO**					
		DIESEL L	GNC	DIESEL L	GNC	DIESEL L	GNC	DIESEL L	GNC	DIESEL L	GNC	DIESEL L	GNC
PV	Peso vehicular	7,000 kg máx.	8,500 kg máx.	7,000 kg máx.	8,500 kg máx.	8,800 kg máx.	10,300 kg máx.	11,600 kg máx.	12,500 kg máx.	7,000 kg máx.	8,500 kg máx.	11,600 kg máx.	12,500 kg máx.
PBV	Peso bruto vehicular	10,500 kg máx.	12,000 kg máx.	10,500 kg máx.	12,000 kg máx.	15,000 kg máx.	16,000 kg máx.	18,600 kg máx.	19,500 kg máx.	10,500 kg máx.	12,000 kg máx.	18,600 kg máx.	19,500 kg máx.
CN	Capacidad nominal	50 pasajeros máx.				80 pasajeros máx.		100 pasajeros máx.		50 pasajeros máx.		100 pasajeros máx.	
AE	Ángulo de entrada	8° mínimo							3	6° mínimo			
AS	Ángulo de salida	8° mínimo							4	6° mínimo			
VT	Volado trasero	65% máx. distancia entre ejes		65% máx. distancia entre ejes				65% máx. distancia entre ejes					
VD	Volado delantero	0.55 máx. distancia entre ejes											
DE	Distancia entre ejes	Será aceptada siempre y cuando la disposición de los ejes permita la distribución adecuada de las cargas así como la maniobrabilidad y dimensiones interiores y exteriores especificadas para cada vehículo											
AT	Altura total	3,800 mm máximo incluyendo elementos externos sobre toldo (tanques de gas natural y aire acondicionado)											
LT	Largo total	7,500 a 10,000 mm incluyendo ambas defensas				8,400 a 10,500 mm incluyendo ambas defensas		10,000 a 12,500 mm incluyendo ambas defensas		7,500 a 10,500 mm incluyendo ambas defensas		10,000 a 12,500 mm incluyendo ambas defensas	
ED	Entrevía delantera	1,630 mm min.				1,950 mm min.		1,630 mm min.		1,630 mm min.		1,950 mm min.	
ET	Entrevía trasera	1,600 mm min.				1,800 mm min.		1,600 mm min.		1,600 mm min.		1,800 mm min.	
ATE	Ancho total	2,500 mm máx. sin espejos y con puertas cerradas				2,600 mm máx. sin espejos y con puertas cerradas		2,500 mm máx. sin espejos y con puertas cerradas		2,500 mm máx. sin espejos y con puertas cerradas		2,600 mm máx. sin espejos y con puertas cerradas	
ASP	Altura de suelo a piso	960 mm máx.				1,150 mm susp. mec y puerta detrás eje delantero		960 mm máx.		360° mm máx. medido a peso vehicular en zona de ascenso y descenso de pasajeros			
	Radio de giro exterior	10,000 mm máx.				12,000 mm máx.		10,000 mm máx.		10,000 mm máx.		12,000 mm máx.	



Espacio disponible para pasajeros de pie: En una concentración máxima de 8 pasajeros por metro cuadrado 0.125m<sup>2</sup>

\*Recomendado para rutas de media y alta montaña, por su tamaño y configuración de tren motriz. Para autobús mediano deberá tener configuración de mandos o semiadelantos (unidad chata o semichata).

\*\*Recomendado para rutas planas por su configuración de tren motriz.

1 12,500 Kg máximo para unidades con aire acondicionado.

2 13,500 Kg máximo para unidades con aire acondicionado.

3 7 grados para unidades a gas natural con tanques de GNC por debajo del chasis y con suspensión neumática.

4 7 grados para unidades a gas natural con tanques de GNC por debajo del chasis y con suspensión neumática.

5 1,150 mm máximo para unidades a gas natural con tanques de GNC por debajo del chasis y con suspensión neumática.

6 450 mm máximo para unidades con suspensión y arrodillamiento.

Fuente: Decreto Oficial del Director Federal 14 de octubre 2014

Figura 1. 14 Lineamientos Para La Fabricación y Diseño de Autobuses de Transporte Público-Fuente:(SEMOVI, 2014)

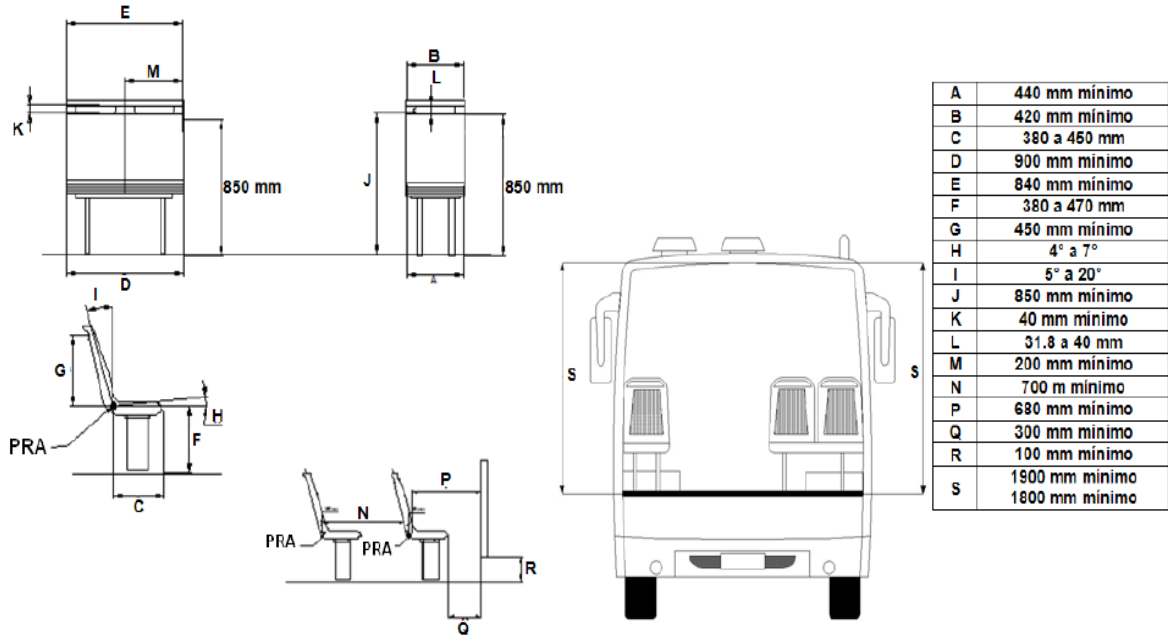


Figura 1. 15 Especificaciones técnicas de los asientos de los pasajeros, fuente: GDF 2014b

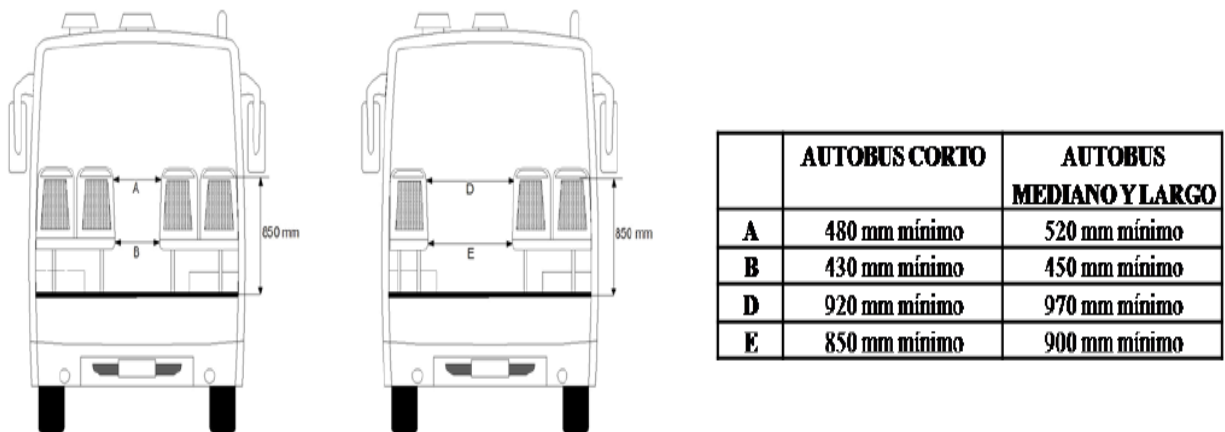
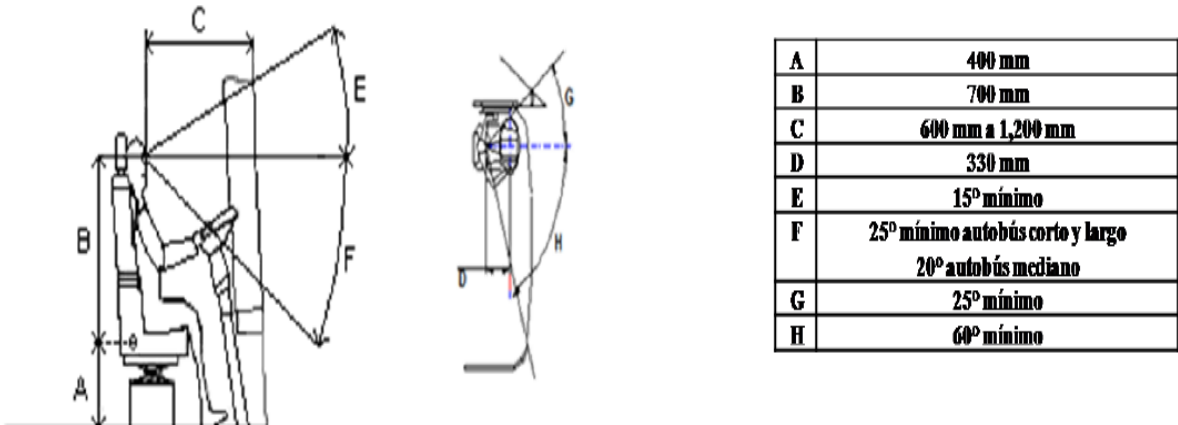


Figura 1. 16 Especificaciones técnicas de los pasillos, fuente: GDF 2014b

DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN
Altura del asiento	Ajustable con 450 mm máximo, medido de la base del asiento al PRA
Ancho de asiento	450 a 500 mm, medido a la mitad del asiento
Profundidad de asiento	400 a 500 mm
Ancho de respaldo	350 mm mínimo, medido a una altura de 500 mm de la superficie del asiento
Punto máximo de excentricidad de apoyo lumbar	220 a 240 mm, medido a partir del PRA
Altura de respaldo	500 a 600 mm, medido a partir del PRA
Altura de respaldo con apoyacabezas integrado	800 mm mínimo, medido a partir del PRA
Ángulo de asiento con respecto a la horizontal	5° a 11°
Ángulo de respaldo con respecto a la vertical	5° a 12°
Alto de apoyacabezas	150 mm mínimo
Largo de apoyacabezas	300 mm mínimo
Ajuste de apoyacabezas	100 mm mínimo
Ajuste vertical de altura de asiento	100 mm mínimo
Ajuste horizontal de asiento	120 mm mínimo
Distancia del centro de descansabrazo a centro de simetría de asiento (descansabrazo opcional)	260 a 290 mm
Altura del descansabrazo a superficie del asiento (descansabrazo opcional)	170 a 260 mm

*Figura 1. 17 Especificaciones técnicas del asiento del conductor, fuente: GDF 2014b*



*Figura 1. 18 Especificaciones técnicas para los ángulos de visibilidad del conductor, fuente: GDF 2014b*



## 2. SISTEMA DE TRANSPORTE INTERNO PUMABÚS

En este capítulo se presenta información acerca de los parámetros que determinan la operación del Sistema de Transporte Interno Pumabús, como frecuencias, características de la flota de vehículos, las rutas y sus paradas, horas de máxima demanda, y tiempo de ascenso y descenso de pasajeros en cada una de las estaciones.

### 2.1 Introducción

El Sistema de Transporte Interno Pumabús es el servicio de transporte que se brinda en el campus universitario de la Universidad Nacional Autónoma de México de forma gratuita, el recorrido de sus rutas se realiza en vías exclusivas para su operación y en vías tipo C.

La siguiente información presenta aspectos generales sobre la administración del sistema, y la cual fue proporcionada por la Dirección General de Servicios Generales (DGSG), entidad encargada de la administración del Pumabús en el año 2014.

- Se contaba en total con 57 autobuses.
- Los vehículos de la flota se someten a un mantenimiento preventivo y a mantenimiento correctivo. Durante el año se realizan dos servicios de mantenimiento preventivo a cada una a las unidades, ambos en los periodos vacacionales de la Universidad, por lo regular en julio y diciembre. Los mantenimientos correctivos se realizan en el momento en el que se requieran y se llevan a cabo en el Taller Mecánico Diésel de la DGSG.
- La demanda diaria total del Sistema de Transporte Interno Pumabús está estimada en aproximadamente 146,000 usuarios, la demanda por cada ruta está dada en porcentajes puesto que la cantidad de usuarios cambia de un día para otro; pero, los porcentajes de demanda de cada parada con relación a la demanda total se mantiene aproximadamente igual.
- Se cuenta con 150 conductores, con quienes no se cuenta todos los días, puesto que muchos de ellos faltan al trabajo por alguna de las siguientes razones: incapacidad, problemas personales, retardos, eventos sindicales, vacaciones. Cada conductor tiene 10 días de descanso al año, adicionalmente cuenta con las vacaciones que estipula la ley, las cuales dependen del tiempo de permanencia en el trabajo. Esta problemática impide la programación y ejecución oportuna de las rutas.
- El número de unidades de vehículos que operan por ruta en un lapso de tiempo determinado depende del número de autobuses y el número de conductores disponibles en ese momento.

- El Sistema de Transporte Interno Pumabús cuenta con cuatro puntos de control ubicados en los siguientes paraderos: Metro Universidad, Metrobús CU, Estadio y Zona Cultural.

El Sistema de Transporte Interno Pumabús cuenta con 12 rutas y una ruta de transporte especial (Ruta 36) para personas de movilidad reducida. En la tabla 2.1 se presenta la respectiva información. Sin embargo, cabe señalar que para el año 2016 la flota vehicular ha aumentado, por lo que se espera variación en los porcentajes de demanda de cada una de las rutas.

Ruta	Número de Paradas	Número de Buses	Porcentaje de demanda (%)
1	16	7	16,5
2	10	7	17,1
3	15	7	9,1
4	14	5	3,5
5	16	6	13,2
6	24	4	3,5
7	16	5	10,6
8	18	4	10,4
9	13	5	14,2
10	13	6	1,2
11	14	3	0,3
12	7	2	0,4
36	-	1	

*Tabla 2.1-Rutas del Sistema de Transporte de Pasajeros de CU- PUMABÚS*

## 2.2 Rutas del sistema de transporte Pumabús

El sistema de transporte interno Pumabús está conformado por 12 rutas y 88 paradas (figuras 2.14 y 2.15 respectivamente). Para su digitalización se utilizó la aplicación para Android: OruxMaps, mediante el comando “Grabar Track”. En el transcurso de cada recorrido se agregaban cada una de las paradas, utilizando el botón Creación Waypoint. Es necesario configurar previamente la aplicación, para que los tracks creados en cada recorrido se almacenen con la extensión .kml. El nombre de las estaciones se unificó con el que maneja el Hiperpuma, aplicación online del Grupo de Investigación en Ingeniería de Transporte y Logística (GiiTral) del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Los tiempos de ascenso y descenso de pasajeros en cada una de las paradas de cada ruta para cada hora de máxima demanda (la determinación de las horas de máxima demanda se explica en la sección 2.4) se obtuvieron a partir de los datos de GPS del año 2014, proporcionados por DGSG y previamente procesados por el GiiTral. De estos datos se extrajo la media del tiempo

que se tardan los autobuses en las paradas de cada ruta, y sólo fueron considerados los promedios con una desviación estándar de 40 segundos; sin embargo, no todos los autobuses poseen GPS, por lo tanto, no se tiene información de algunas de las paradas, por lo que fue necesario hacer trabajo de campo para obtener esta información.

### **Ruta 1**

La ruta 1 recorre el Circuito Escolar de CU, su recorrido es de aproximadamente 6.3 km, en su recorrido realiza las paradas: Metro Universidad Oriente, CENDI, Psiquiatría, Química, CELE, Ingeniería Norte, Arquitectura, Rectoría, Psicología, Filosofía y Letras Sur, Derecho Sur, Economía Sur, Odontología Sur, Medicina, Veterinaria, Instituto de Geofísica y Química Conjunto D y E. La velocidad media de recorrido fue de 10 km/h<sup>1</sup>.(ver figura 2.1 y figura 2.1.1). Los tiempos de ascenso y descenso de cada una de sus paradas se presenta en la tabla 2.2.1.

### **Ruta 2**

La ruta 2 recorre el Circuito exterior de CU, su recorrido es de aproximadamente 3.8 km, con una velocidad media de recorrido de 18.1 km/h<sup>2</sup>, en su recorrido cubre las paradas: Metro Universidad Poniente, Química Conjunto D y E, Ciencias por Circuito de la Investigación Norte, Ciencias Circuito Exterior, Contaduría, Trabajo Social, Metrobús CU Oriente, Metrobús CU Sur, Educación a Distancia, Cómputo Académico y Ciencias por Circuito de la Investigación Sur (ver figura 2.2 y figura 2.2.1). En la Tabla 2.2.2 se presenta los tiempos de ascenso y descenso de pasajeros en cada una de sus paradas.

### **Ruta 3**

La ruta 3 conecta la estación Metro Universidad con la Zona Cultural de CU , esta ruta recorre aproximadamente 9.5 kilómetros a una velocidad media de 19.9 km/h<sup>3</sup>, recorre las estaciones Metro Universidad Oriente, Química Conjunto D y E, Tienda UNAM, Ciencias Políticas, Investigaciones Jurídicas Norte, Biblioteca Nacional Poniente, Centro Cultural, Unidad de Posgrado, Posgrado de Economía, Revalidación de Estudios, Personal Académico, Archivo General, Avenida del Imán, Investigaciones Filológicas, Investigaciones Filosóficas, Coordinación de Humanidades, Universum, Teatro y Danza, MUAC, Biblioteca Nacional Oriente, Espacio Escultórico, Investigaciones Jurídicas Sur, TV UNAM y la Parada Exclusiva Ruta 12(ver figura 2.3). En la tabla 2.2.3 se presentan los tiempos de ascenso y descenso de pasajeros para cada una de las estaciones.

---

<sup>1</sup> Dato obtenido en el horario 14:55 a 15:33 horas

<sup>2</sup> Dato obtenido en el horario de 11:36 a 11:49 horas

<sup>3</sup> Dato obtenido en el horario de 18:17 a 18:45 horas

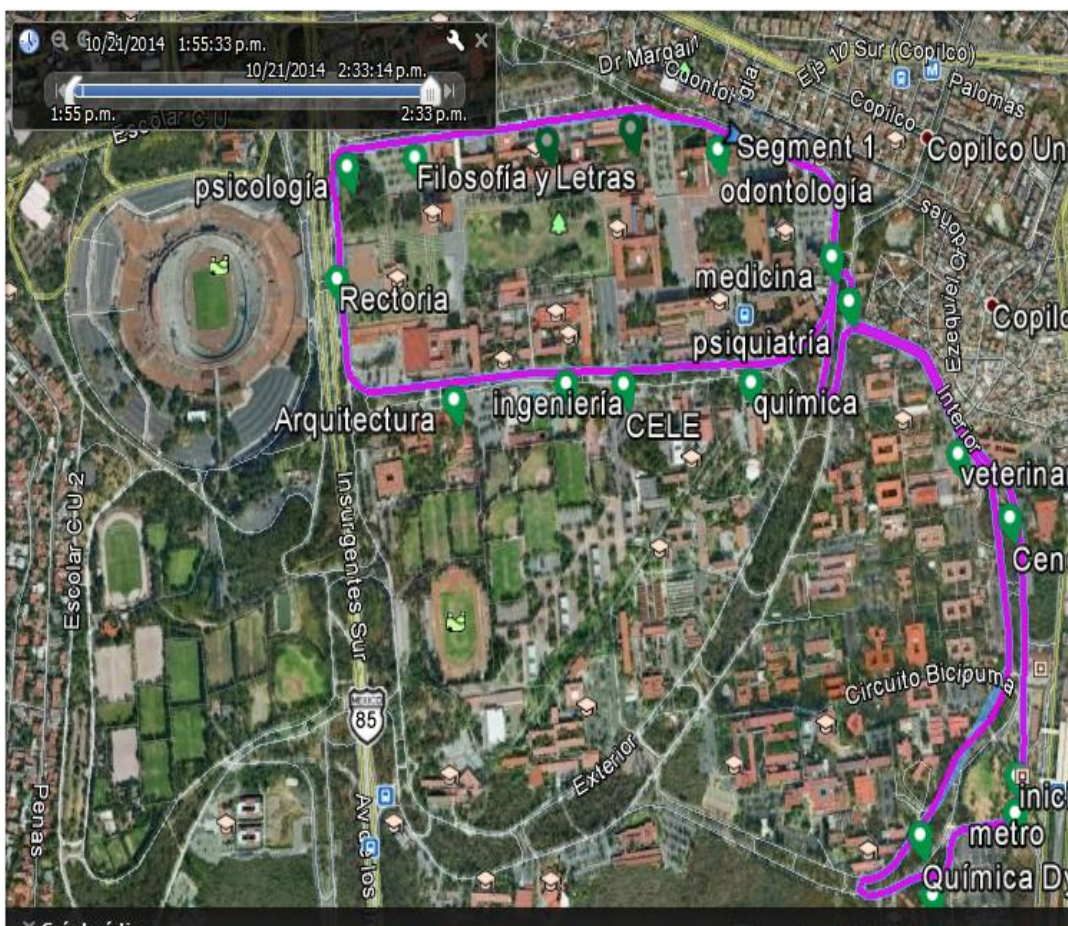


Figura 2. 1 Ruta 1

Parada	7 a 8 h (seg)	15 a 16 h(seg)
Metro Universidad Oriente	158	43
CENDI	21	14
Psiquiatría	13	15
Química	10	18
CELE	8	42
Ingeniería Norte	11	13
Arquitectura	10	7
Rectoría	0	8
Psicología	7	7
Filosofía y Letras Sur	10	65
Derecho Sur	8	8
Economía Sur	24	50
Odontología Sur	7	8
Medicina	17	38
Veterinaria	7	0
Instituto de Geofísica	38	23
Química Conjunto D y E	0	6

Tabla 2.2.1 Tiempos de Ascenso y Descenso de Pasajeros en las Paradas de la Ruta 1



Figura 2.1.1 Croquis Ruta 1 Fuente: DGSG-UNAM (2016)



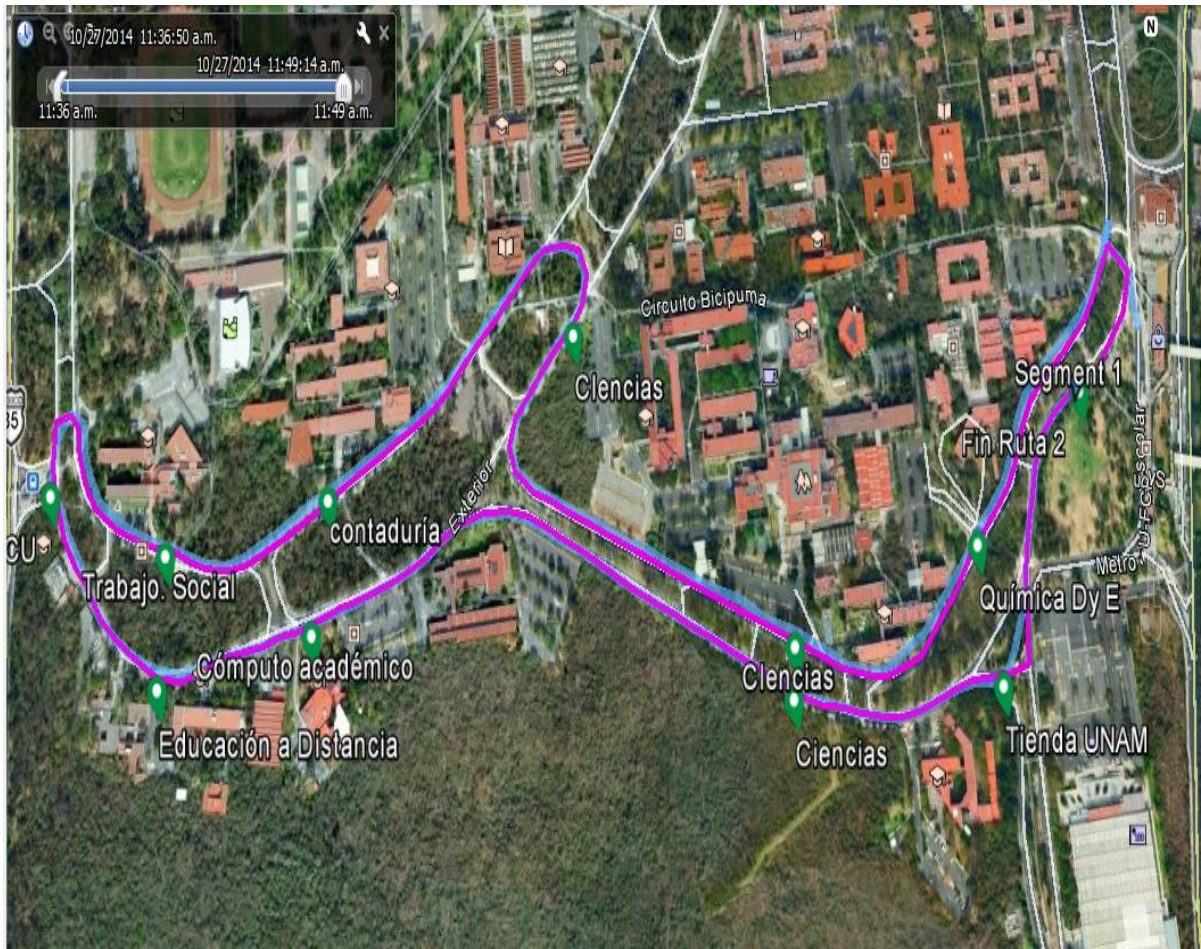


Figura 2. 2 Ruta 2

Parada	7 a 8 h (seg)	15 a 16 h(seg)
Metro Universidad Poniente	79	84
Química Conjunto D y E	16	13
Ciencias por Circuito de la Investigación Norte	10	8
Pumabús Ciencias, paradero Circuito Exterior	65	81
Contaduría	27	30
Trabajo Social	11	27
Metrobús CU Oriente	33	54
Metrobús CU Sur	52	75
Educación a Distancia	7	7
Computo Académico	33	24
Ciencias por Circuito de la Investigación Sur	11	9

Tabla 2.2.2 Tiempos de Ascenso y Descenso de Pasajeros en las Paradas de la Ruta 2



Figura 2.2.1 Croquis Ruta 2 Fuente: DGSG-UNAM (2016)



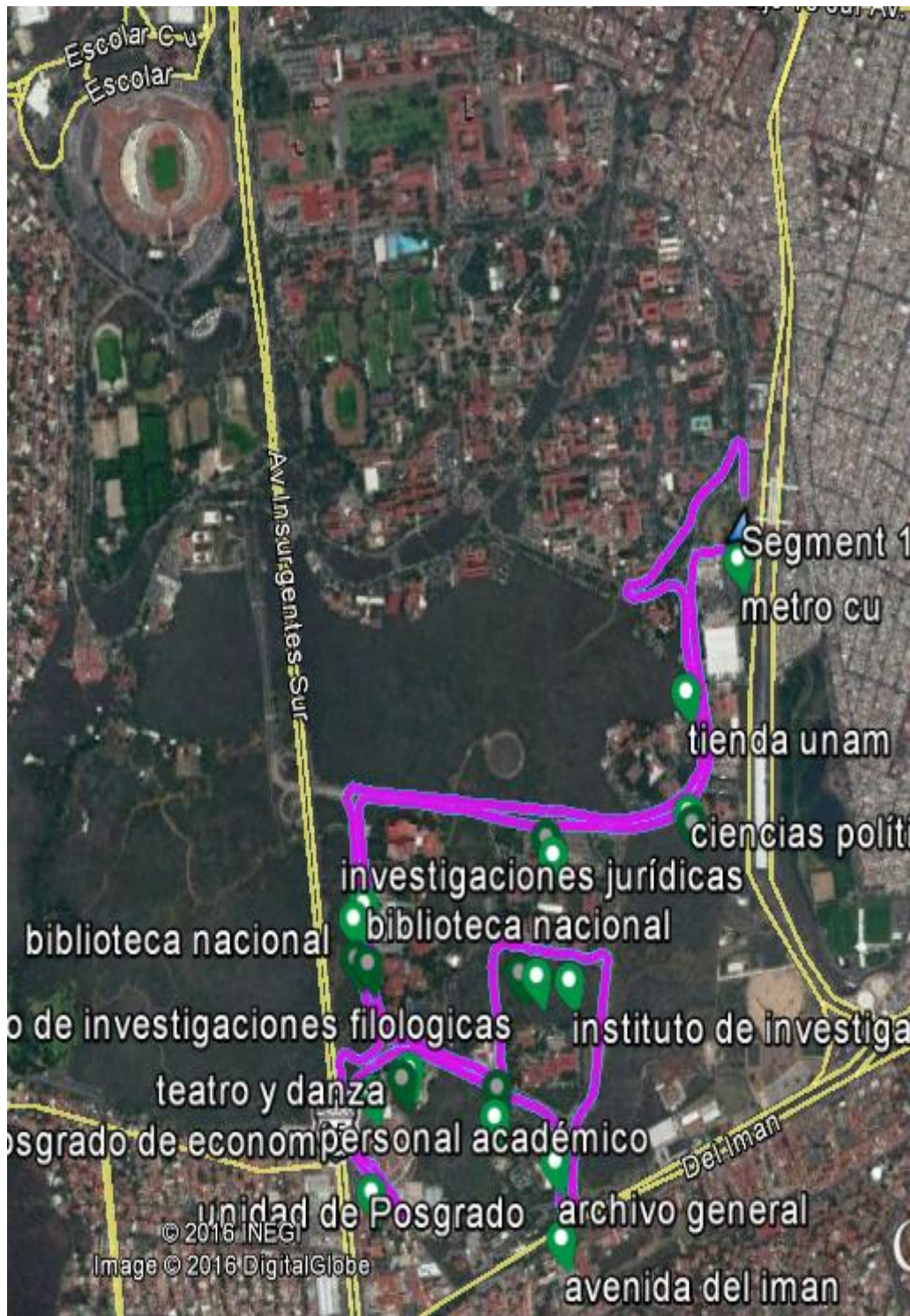


Figura 2. 3 Ruta 3



Parada	7 a 8 h (Seg)	15 a 16 h (Seg)
Metro Universidad Oriente	16	25
Química Conjunto D y E	11	15
Tienda UNAM	8	8
Ciencias políticas	8	8
Investigaciones Jurídicas Norte	7	8
Biblioteca Nacional, Hemeroteca Nacional Poniente	21	29
Centro cultural	8	8
Unidad de Posgrado	10	13
Posgrado de Economía	125	7
Revalidación de Estudios	8	9
Personal Académico	11	20
Archivo General	88	108
Avenida del Imán	11	38
Investigaciones Filológicas	9	9
Investigaciones Filosóficas	9	9
Coordinación de Humanidades	13	22
Universum	8	8
Teatro y Danza	12	12
MUAC	7	8
Biblioteca Nacional, Hemeroteca Nacional Oriente	16	25
Espacio Escultórico	11	11
Investigaciones Jurídicas Sur	9	8
TV UNAM	8	8
Parada Exclusiva Ruta 12	12	12

*Tabla 2.2.3 Tiempos de Ascenso y Descenso de Pasajeros en las Paradas de la Ruta 3*

#### Ruta 4

La ruta 4 transita aproximadamente 6.3 km con una velocidad media de 19.5 km/h<sup>4</sup>, y recorre las paradas: Metro Universidad Poniente, Química Conjunto D y E, Ciencias por Circuito de la Investigación Norte, Ciencias paradero Circuito exterior, Contaduría, Trabajo social, Metrobús CU oriente, Estadio de prácticas, Campos de Futbol I, Jardín Botánico, Campos de Futbol II, Metrobús CU Sur, Educación a Distancia, Cómputo Académico y Ciencias por Circuito de la Investigación Sur (ver figuras 2.4 y 2.4.1). En la tabla 2.2.4 se presentan los tiempos de ascenso y descenso para cada una de las paradas de la ruta 4.

<sup>4</sup> Dato obtenido en el horario de 11:50 a 12:10 horas

### **Ruta 5**

Esta ruta comunica la estación Metro Universidad con la zona norte de CU, recorre aproximadamente 6.6 kilómetros a una velocidad media de 7.3 km/h<sup>5</sup>, y circula por las paradas Metro Universidad Oriente, CENDI, Psiquiatría, Salida Medicina, Odontología Norte, Economía Norte, Avenida Universidad, Derecho Norte, Filosofía y Letras Norte, Psicología, Filosofía y Letras Sur, Derecho Sur, Economía Sur, Odontología Sur, Medicina, Veterinaria, Instituto de Geofísica y Química Conjunto D y E (ver figuras 2.5 y 2.5.1). Los tiempos de ascenso y descenso de la ruta 5 se presentan en la tabla 2.2.5

### **Ruta 6**

La ruta 6 conecta el Estadio Olímpico con una parte del circuito exterior y el circuito deportivo de CU, su recorrido es de aproximadamente 9.7 kilómetros a una velocidad media de 17.5 km/h<sup>6</sup>, las paradas que aborda esta ruta son Invernadero, Posgrado de Ingeniería, Camino Verde, Contaduría, Trabajo Social, Metrobús CU oriente, Estadio de Prácticas, MUCA, E8, E7, E6, E4, E3, E2, E1, Campos de Fútbol I, Pista de Calentamiento Oriente, Pista de Calentamiento Poniente, Pumitas, Jardín Botánico, Campos de Fútbol II, Investigaciones Biomédicas, Metrobús CU Poniente, Metrobús CU Sur, Educación a Distancia, Cómputo Académico, Ciencias, paradero Circuito Exterior y Ciencias del Mar (ver figuras 2.6 y 2.6.1). Los tiempos de ascenso y descenso de la ruta 6 se presentan en la tabla 2.2.6

### **Ruta 7**

La ruta 7 conecta el estadio olímpico con las facultades ubicadas en el circuito interior de CU, recorre una distancia aproximada de 4.7 kilómetros a una velocidad media de 11.8 km/h<sup>7</sup>, las paradas que recorre esta ruta son Psicología, Filosofía y Letras Sur, Derecho Sur, Economía Sur, Odontología Sur, Medicina, Química, CELE, Ingeniería Norte, Arquitectura, E8, E7, E6, E4, E3, E2 y E1 (ver figuras 2.7 y 2.7.1). Los tiempos de ascenso y descenso de pasajeros se presentan en la tabla 2.2.7.

---

<sup>5</sup> Dato obtenido en el horario de 14:18 a 15:10 horas

<sup>6</sup> Dato obtenido en el horario de 16:27 a 17 horas

<sup>7</sup> Dato obtenido en el horario de 14:02 a 14:26 horas

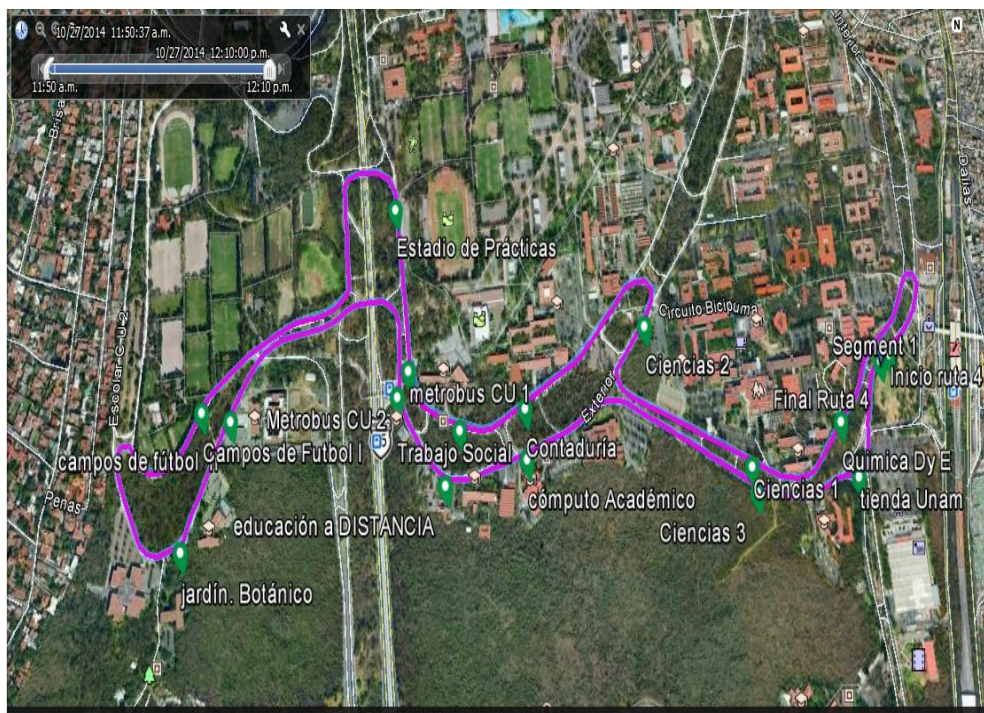


Figura 2. 4 Ruta 4

Parada	7 a 8 h (Seg)	15 a 16 h (Seg)
Metro Universidad Poniente	127	92
Química Conjunto D y E	18	14
Ciencias por Circuito de la Investigación Norte	10	7
Ciencias paradero Circuito Exterior	56	70
Contaduría	73	72
Trabajo Social	28	26
Metrobús CU Oriente	41	30
Estadio de Prácticas	8	14
Campos de Fútbol I	15	14
Jardín Botánico	40	11
Campos de Fútbol II	18	24
Metrobús CU Sur	38	43
Educación a Distancia	5	14
Cómputo Académico	23	18
Ciencias por Circuito de la Investigación Sur	11	7

Tabla 2.2.4 Tiempos de Ascenso y Descenso de Pasajeros en las Paradas de la Ruta 4



Figura 2.4.1 Croquis Ruta 4 - Fuente:DGSG-UNAM (2016)



Figura 2. 5 Ruta 5

Parada	7 a 8 h (Seg)	15 a 16 h (Seg)
Metro Universidad Oriente	86	59
CENDI	10	7
Psiquiatría	10	9
Salida Medicina	9	15
Odontología Norte	14	13
Economía Norte	45	17
Avenida Universidad	9	8
Derecho Norte	45	34
Filosofía y Letras Norte	115	9
Psicología	18	29
Filosofía y Letras Sur	117	10
Derecho Sur	127	9
Economía Sur	9	11
Odontología Sur	14	13
Medicina	18	11
Veterinaria	7	10
Instituto de Geofísica	10	10
Química Conjunto D y E	40	40

Tabla 2.2.5 Tiempos de Ascenso y Descenso de Pasajeros en las Paradas de la Ruta 5





Figura 2.5.1 Croquis Ruta 5 - Fuente:DGSG-UNAM (2016)



Figura 2. 6 Ruta 6



Figura 2.6.1 Croquis Ruta 6 - Fuente:DGSG-UNAM (2016)



Ing. Sonia Marcela Cifuentes Martínez  
**TESIS DE MAESTRÍA**

<b>Parada</b>	<b>7 a 8 h (Seg)</b>	<b>15 a 16 h(Seg)</b>
Invernadero	2	2
Posgrado de Ingeniería	6	9
Camino Verde	9	18
Contaduría	8	10
Trabajo Social	9	20
Metrobús CU Oriente	55	9
Estadio de Prácticas	6	10
MUCA	8	8
E8	8	9
E7	8	5
E6	26	9
E4	9	9
E3	10	7
E2	11	4
E1	8	8
Campos de Fútbol I	6	3
Pista de Calentamiento Oriente	23	11
Pista de Calentamiento Poniente	8	13
Pumitas	14	10
Jardín Botánico	12	10
Campos de Fútbol II	8	40
Investigaciones Biomédicas	23	24
Metrobús CU Poniente	58	42
Metrobús CU Sur	36	78
Educación a Distancia	2	19
Cómputo Académico	27	24
Ciencias, paradero Circuito Exterior	8	46
Ciencias del Mar	9	26

**Tabla 2.2.6 Tiempos de Ascenso y Descenso de Pasajeros en las Paradas de la Ruta 6**

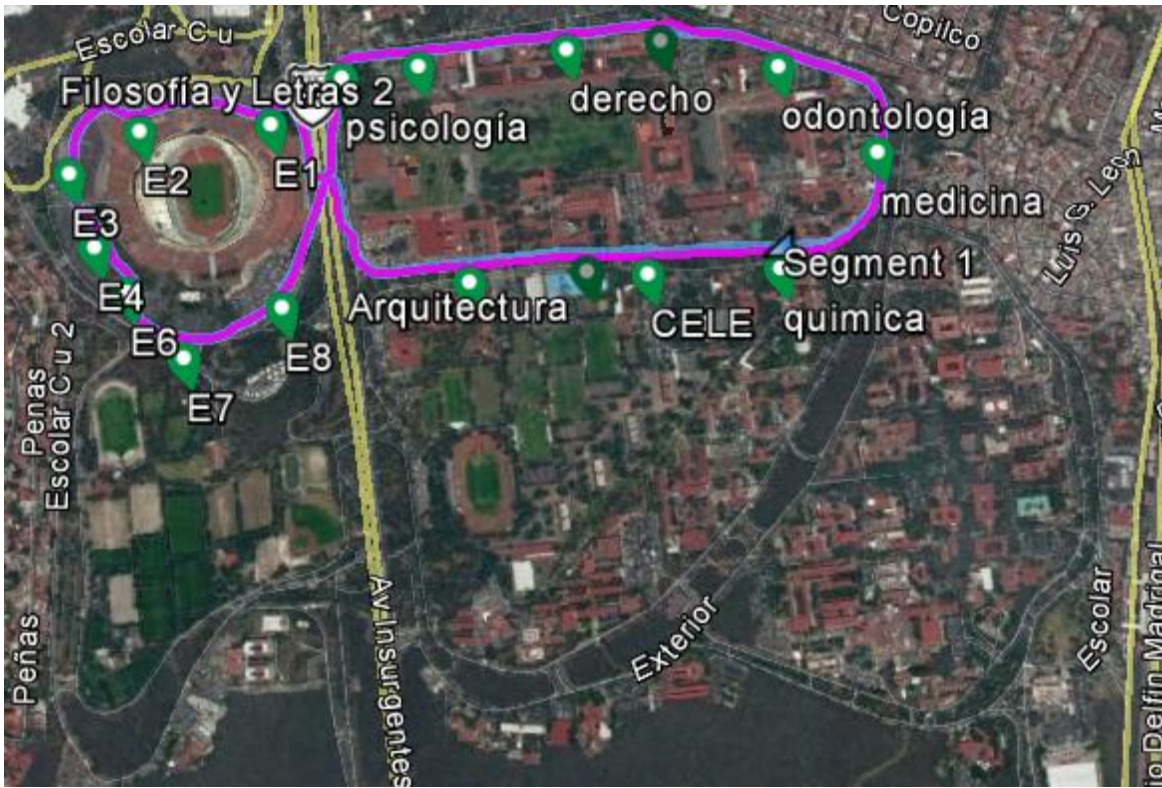


Figura 2. 7 Ruta 7

Parada	7 a 8 h (Seg)	15 a 16 h (Seg)
Psicología	15	11
Filosofía y Letras Sur	28	34
Derecho Sur	9	14
Economía Sur	22	40
Odontología Sur	16	15
Medicina	39	48
Química	50	14
CELE	10	5
Ingeniería Norte	9	2
Arquitectura	10	10
E8	9	8
E7	14	4
E6	26	19
E4	12	9
E3	8	31
E2	2	6
E1	25	34

Tabla 2.2.7 Tiempos de Ascenso y Descenso de Pasajeros en las Paradas de la Ruta 7



Figura 2.7.1 Croquis Ruta 7 - Fuente:DGSG-UNAM (2016)

### **Ruta 8**

La ruta 8 conecta el Estadio Olímpico con las facultades ubicadas en el circuito exterior de CU, recorre aproximadamente 6 kilómetros a una velocidad media de 13.4 km/h <sup>8</sup>, las paradas que realiza esta ruta son Invernadero, Posgrado de Ingeniería, Camino Verde, Contaduría, Trabajo social, Metrobús CU Oriente, Estadio de prácticas, MUCA, E8, E7, E6, E4, E3, E2, E1, Servicios Médicos, Alberca Olímpica, Ingeniería Sur, Frontones e IIMAS (ver figuras 2.8 y 2.8.1). En la tabla 2.2.8 se muestran los tiempos de ascenso y descenso en cada una de las paradas de la ruta 8.

### **Ruta 9**

La ruta 9 conecta las facultades de CU, recorre aproximadamente 4 kilómetros a una velocidad media de 12.4 km/h <sup>9</sup>, esta ruta aborda las paradas Psicología, Filosofía y Letras Sur, Derecho Sur, Economía Sur, Odontología Sur, Medicina, Invernadero, Posgrado de Ingeniería, Camino Verde, Contaduría, Trabajo social, Metrobús CU oriente, Estadio de Prácticas, MUCA y Rectoría (ver figuras 2.9 y 2.9.1). Los tiempos de ascenso y descenso de pasajeros se muestran en la tabla 2.2.9.

### **Ruta 10**

La ruta 10 comunica el centro cultural, parte del circuito deportivo de la universidad con la estación Metro Universidad, esta ruta recorre aproximadamente 11.6 kilómetros a una velocidad promedio de 16 Km/h <sup>10</sup>. Las paradas de la ruta 10 son Biblioteca Nacional Poniente, Centro cultural, Unidad de Posgrado, Posgrado de Economía, Revalidación de Estudios, Personal Académico, Archivo General, Avenida del Imán, Investigaciones Filológicas, Investigaciones Filosóficas, Coordinación de Humanidades, Universum, Teatro y Danza, MUAC, Biblioteca Nacional Oriente, Espacio Escultórico, Investigaciones Jurídicas Sur, TV UNAM, Tienda UNAM: Parada Exclusiva Ruta 12, Tienda UNAM, Ciencias Políticas, Investigaciones Jurídicas Norte, Metrobús CU Oriente, Campos de Fútbol I, Jardín Botánico, Campos de Fútbol II e Investigaciones Biomédicas (ver figura 2.10). Los tiempos de ascenso y descenso para cada una de las paradas de la ruta 10, se muestran en la tabla 2.2.10.

---

<sup>8</sup> Dato obtenido en el horario de 12:20 a 12:47 horas

<sup>9</sup> Dato obtenido en el horario de 14:12 a 14:35 horas

<sup>10</sup> Dato obtenido en el horario de 14:43 a 15:26 horas

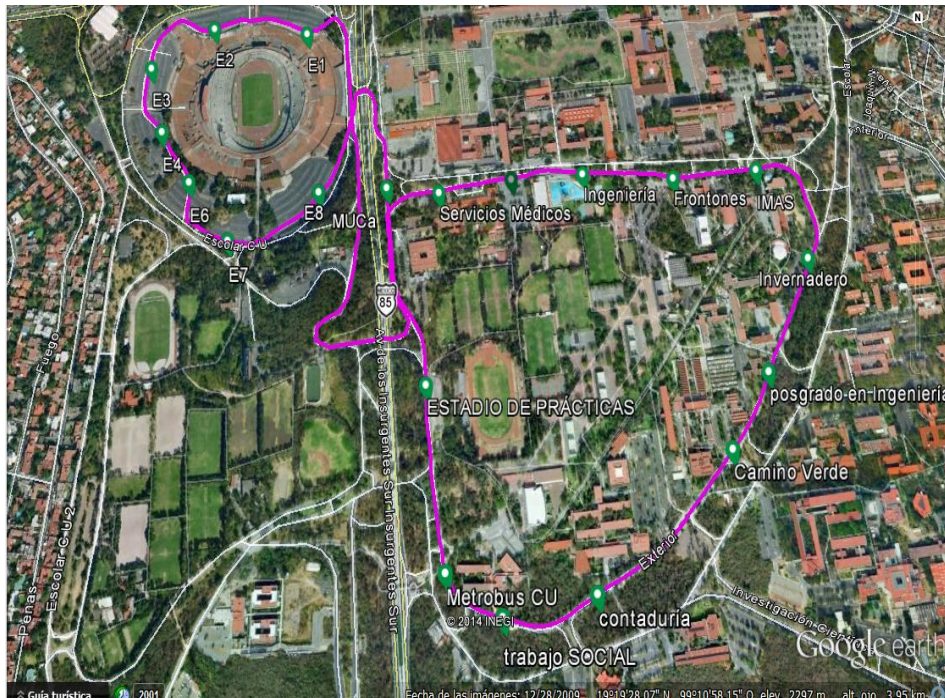


Figura 2. 8 Ruta 8

Parada	7 a 8 h (Seg)	15 a 16 h (Seg)
Invernadero	8	2
Posgrado de Ingeniería	8	9
Camino Verde	8	17
Contaduría	12	8
Trabajo Social	13	24
Metrobús CU Oriente	101	153
Estadio de Prácticas	6	8
MUCA	57	46
E8	8	19
E7	8	8
E6	20	9
E4	5	4
E3	11	8
E2	2	5
E1	29	17
Servicios Médicos	6	8
Alberca Olímpica	3	3
Ingeniería Sur	12	9
Frontones	5	7
IIMAS	37	62

Tabla 2.2.8 Tiempos de Ascenso y Descenso de Pasajeros en Las Parada de la Ruta 8





Figura 2.8.1 Croquis Ruta 8 - Fuente:DGSG-UNAM (2016)

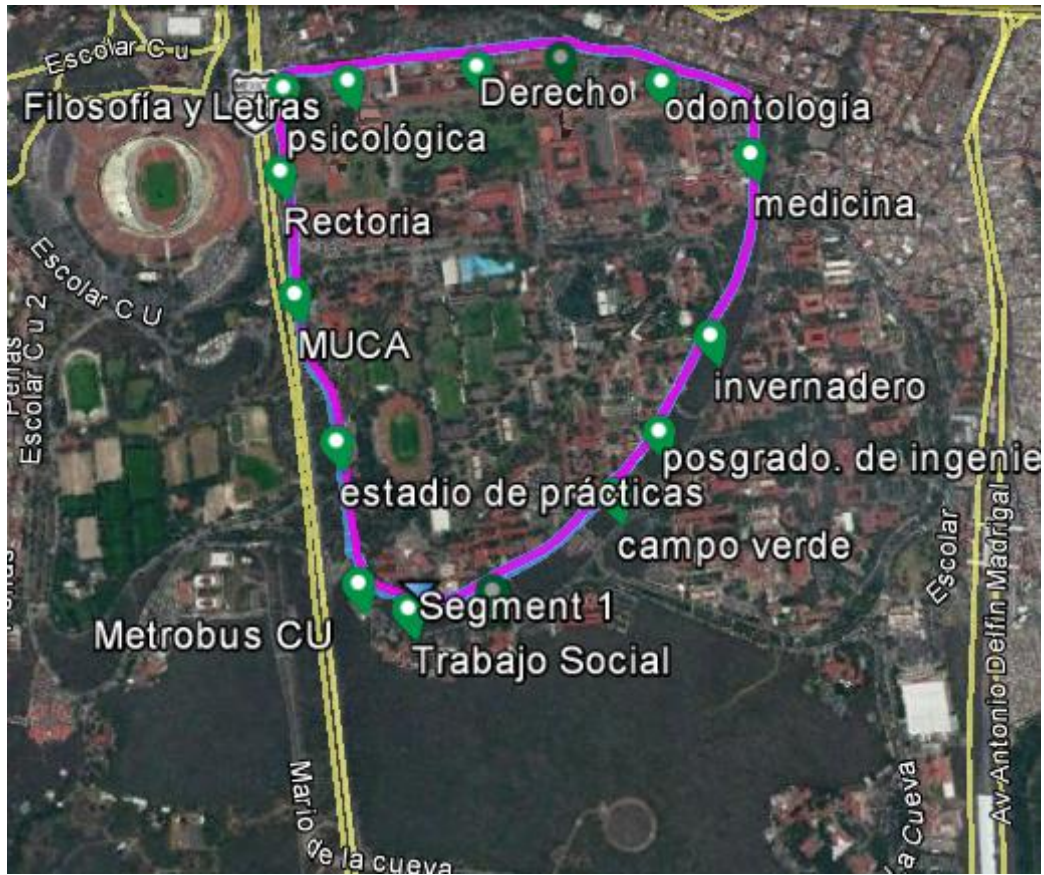


Figura 2. 9 Ruta 9

Parada	7 a 8 h (Seg)	15 a 16 h (Seg)
Psicología	8	9
Filosofía y Letras Sur	29	23
Derecho Sur	10	12
Economía Sur	10	27
Odontología Sur	18	16
Medicina	28	29
Invernadero	7	7
Posgrado de Ingeniería	5	8
Camino Verde	24	28
Contaduría	13	12
Trabajo Social	8	9
Metrobús CU Oriente	142	106
Estadio de Prácticas	6	6
MUCA	12	12
Rectoría	7	6

Tabla 2.2.9 Tiempos de Ascenso y Descenso de Pasajeros en las Paradas de la Ruta 9



Figura 2.9.1 Croquis Ruta 9 - Fuente:DGSG-UNAM (2016)





Figura 2. 10 Ruta 10

Paradas	7 a 8 h (Seg)	15 a 16 h (Seg)
Biblioteca Nacional Poniente	11	29
Centro cultural	17	8
Unidad de Posgrado	54	13
Posgrado de Economía	12	7
Revalidación de Estudios	11	9
Personal Académico	12	20
Archivo General	7	108
Avenida del Imán	28	38
Investigaciones Filológicas	9	9
Investigaciones Filosóficas	20	9
Coordinación de Humanidades	13	22
Universum	18	8
Teatro y Danza	12	12
MUAC	29	8
Biblioteca Nacional Oriente	4	25
Espacio Escultórico	13	13
Investigaciones Jurídicas Sur	16	8
TV UNAM	5	8
Ciencias Políticas	14	8
Tienda UNAM, Parada Exclusiva Ruta 12	12	12
Tienda UNAM	55	55
Investigaciones Jurídicas Norte	10	10
Metrobús CU Poniente	9	9
Campos de Fútbol I	141	159
Jardín Botánico	13	13
Campos de Fútbol II	101	101
Investigaciones Biomédicas	28	28

*Tabla 2.2.10 Tiempos de Ascenso y Descenso de Pasajeros en las Paradas de la Ruta 10*

## Ruta 11

La ruta 11 comunica las paradas ubicadas en una de las zonas aledañas al Estadio Olímpico con el circuito deportivo de CU, recorre aproximadamente 5.8 kilómetros a una velocidad media de 16.6 Km/h<sup>11</sup>. Las paradas que realiza la ruta 11 son Metrobús CU Poniente, Estadio de Prácticas, MUCA, E8, E7, Relaciones Laborales, Obras y Construcción, AAPAUNAM, UDUAL, Pista de Calentamiento Poniente, Pumitas, Jardín Botánico, Campos de Fútbol II y Metrobús CU Sur (ver figuras 2.11 y 2.11.1). Los tiempos de ascenso y descenso para cada una de las paradas de la ruta 11 se muestran en la tabla 2.2.11.

<sup>11</sup> Dato obtenido en el horario de 15:52 a 16:13

## Ruta 12

La ruta 12 recorre aproximadamente 3.8 km con una velocidad media de 18.5 Km/h <sup>12</sup>, las paradas que realiza la ruta 12 son Instituto de Astronomía, Investigación Científica, Instituto de Química, Ciencias del Mar, Invernadero, Posgrado de Ingeniería, Camino Verde, Contaduría, Trabajo Social, Metrobús CU Oriente, Metrobús CU Sur, Educación a Distancia, Cómputo Académico y Ciencias: paradero Circuito Exterior (ver figura 2.12).

Esta ruta presenta una variación entre las 8 am a 10 am, de 1 a 4 pm y de 6 a 8 pm (Ruta 12.1), en estos horarios la ruta después de la parada Ciencias del Mar, se extiende hasta cubrir el Circuito de Investigación Científica hasta llegar nuevamente a la parada Ciencias Circuito Exterior. Sin embargo, cada recorrido de la ruta 12.1 se realiza alternamente con el recorrido de la ruta 12 (ver figura 2.13).

Parada	7 a 8 h (Seg)	15 a 16 h (Seg)
Metrobús CU Oriente	92	92
Estadio de Prácticas	10	8
MUCA	5	9
E8	12	12
E7	5	5
Relaciones Laborales	8	8
Obras y Construcción	7	7
AAPAUNAM	21	21
UDUAL	58	21
Pista de Calentamiento Poniente.	8	9
Pumitas	11	10
Jardín Botánico	39	13
Campos de Fútbol II	8	11
Metrobús CU Sur	98	86

*Tabla 2.2.11 Tiempos de Ascenso y Descenso de Pasajeros en las Paradas de la Ruta 11*

---

<sup>12</sup> Dato obtenido en el horario de 11:51 a 12:04



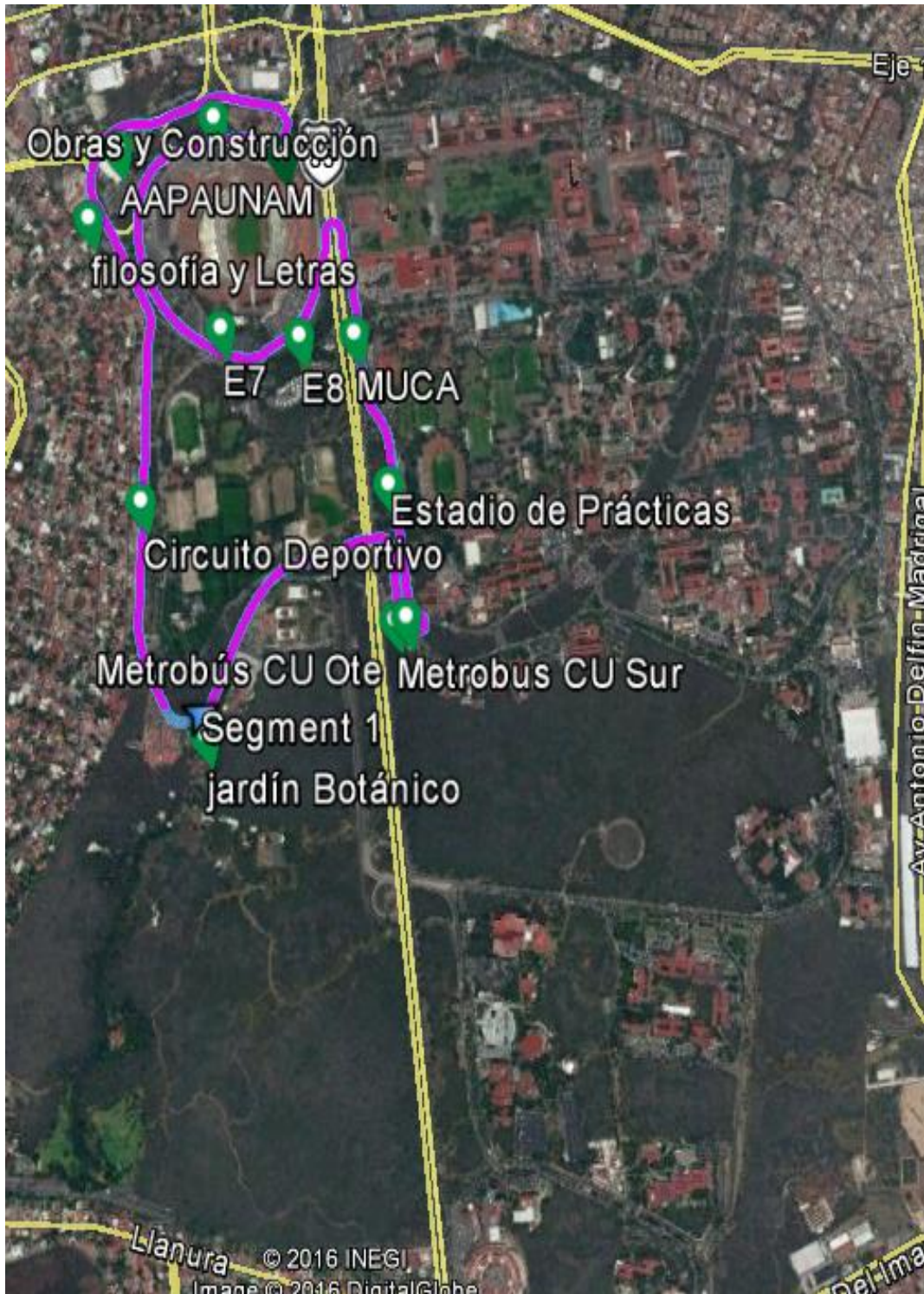


Figura 2. 11 Ruta 11

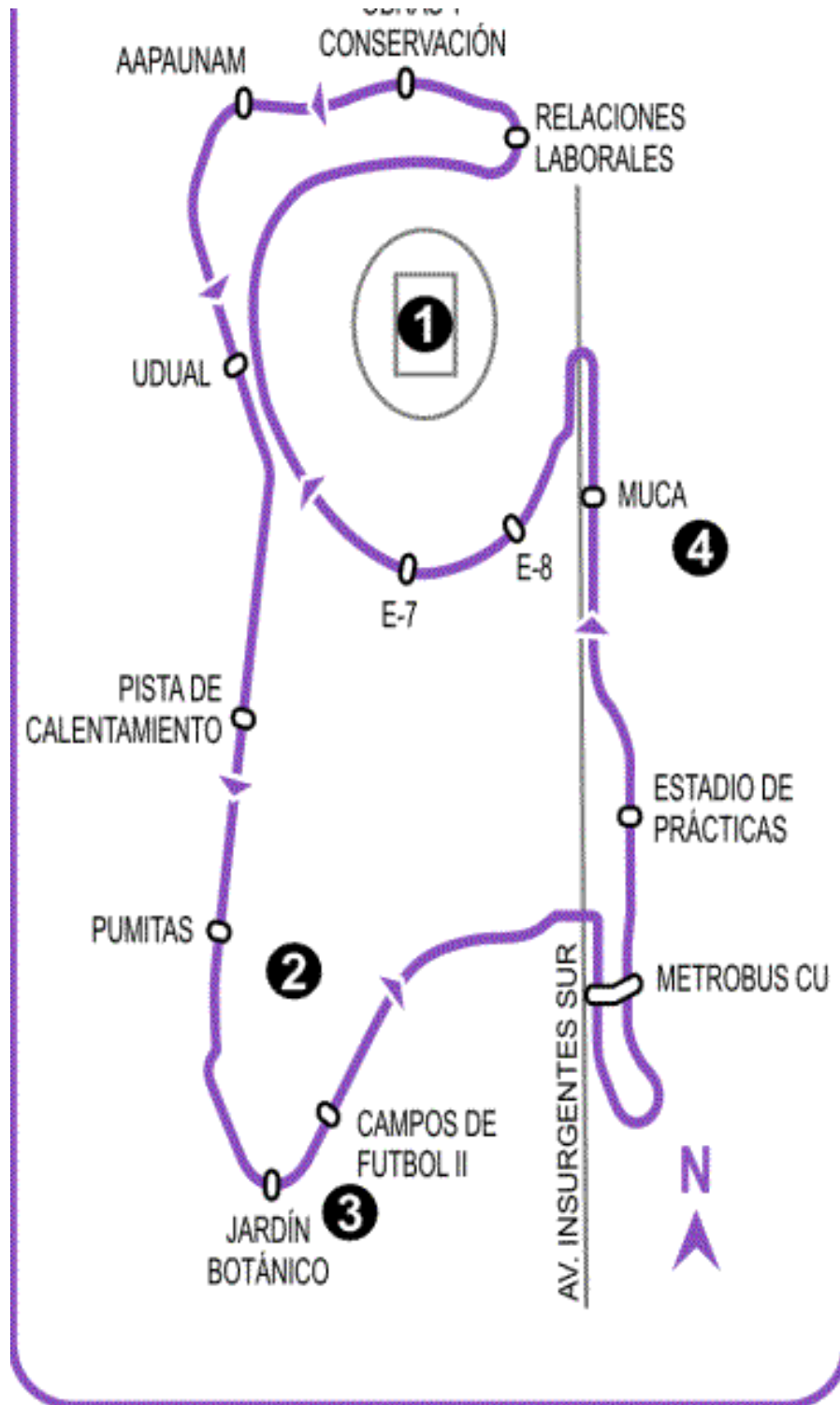


Figura 2.11.1 Croquis Ruta 11 - Fuente:DGSG-UNAM (2016)



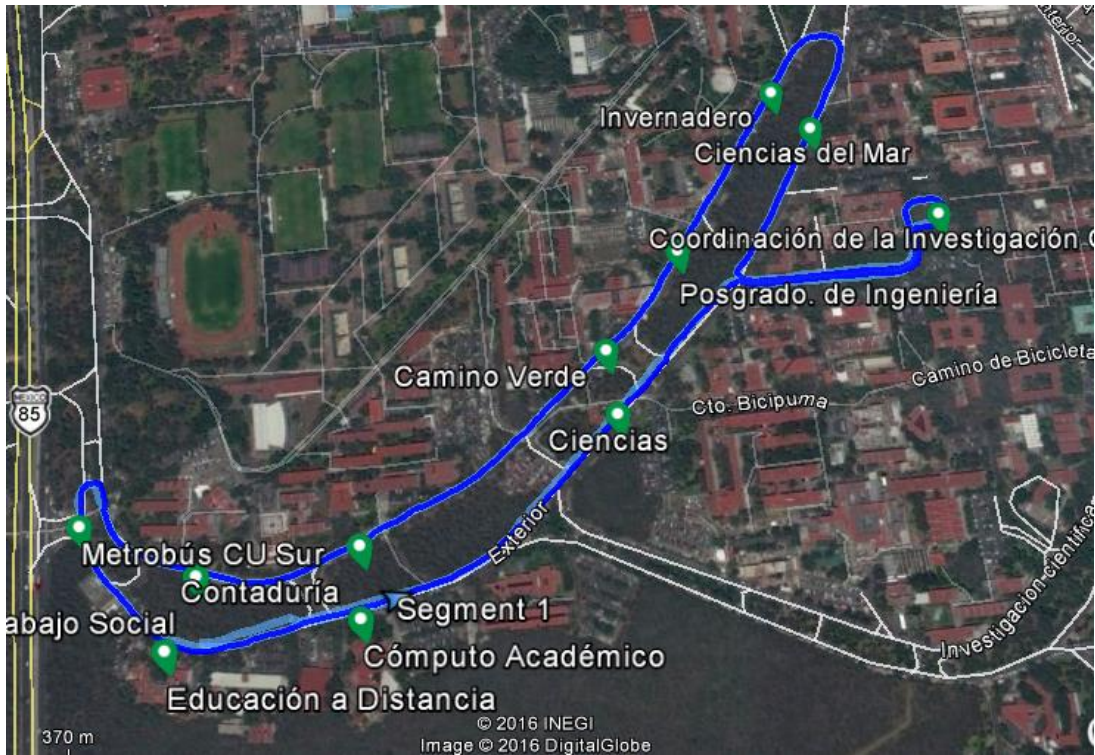


Figura 2. 12 Ruta 12

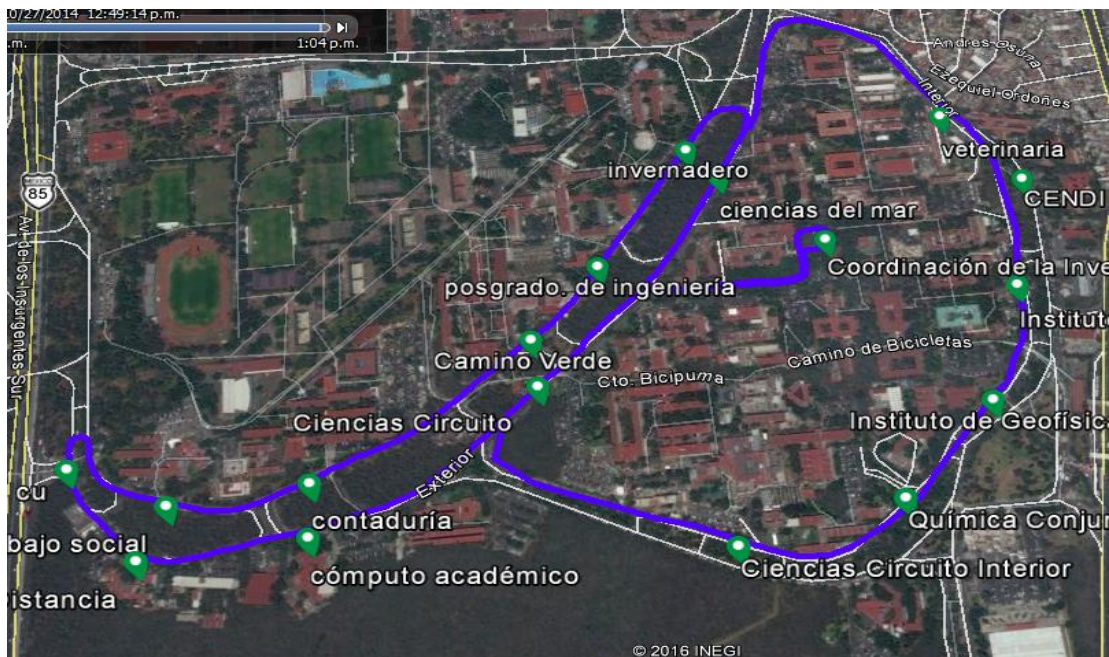


Figura 2. 13 Ruta 12.1

Parada	7 a 8 h (Seg)	15 a 16 h(Seg)
Instituto de Astronomía	20	152
Investigación Científica	90	112
Instituto de Química	90	116
Ciencias del Mar	26	26
Invernadero	9	8
Posgrado de Ingeniería	14	14
Camino Verde	10	4
Contaduría	10	14
Trabajo Social	29	29
Metrobús CU Oriente	70	101
Metrobús CU Sur	108	17
Educación a Distancia	8	14
Cómputo Académico	3	16
Ciencias, paradero Circuito Exterior	19	8

*Tabla 2.2.12 Tiempos de Ascenso y Descenso de Pasajeros en las Paradas de la Ruta 12*

En la figura 2.14 se observa las 12 rutas del sistema de transporte interno Pumabús, evidenciando que en las paradas Contaduría, Trabajo Social, Metrobús CU Oriente, Metrobús CU Sur, Educación a Distancia y Cómputo Académico son las paradas donde se traslapan el mayor número de rutas. También se observa que la cantidad de rutas que transitan sobre los circuitos que bordean la zona del Estadio Olímpico de CU es superior a circuitos de gran importancia como el Circuito Investigación Científica o Mario de la Cueva, su importancia es debida a que conectan las paradas del Pumabús aledañas a la Estación del Metro: Ciudad Universitaria con la zona norte y la zona sur de CU, respectivamente.

### **2.3 Oferta del sistema de transporte interno Pumabús**

Los principales elementos que determinan la oferta en un sistema de transporte público de pasajeros son el tamaño de la flota vehicular y su capacidad, la infraestructura (estaciones o paradas) y la gestión de flota (frecuencias, horarios de prestación del servicio, porcentaje de ocupación de los vehículos, etc.); ésta determina el nivel de servicio con el cual se atiende la demanda del sistema. A continuación, se presenta información acerca de la flota vehicular y las frecuencias de las rutas del Pumabús.

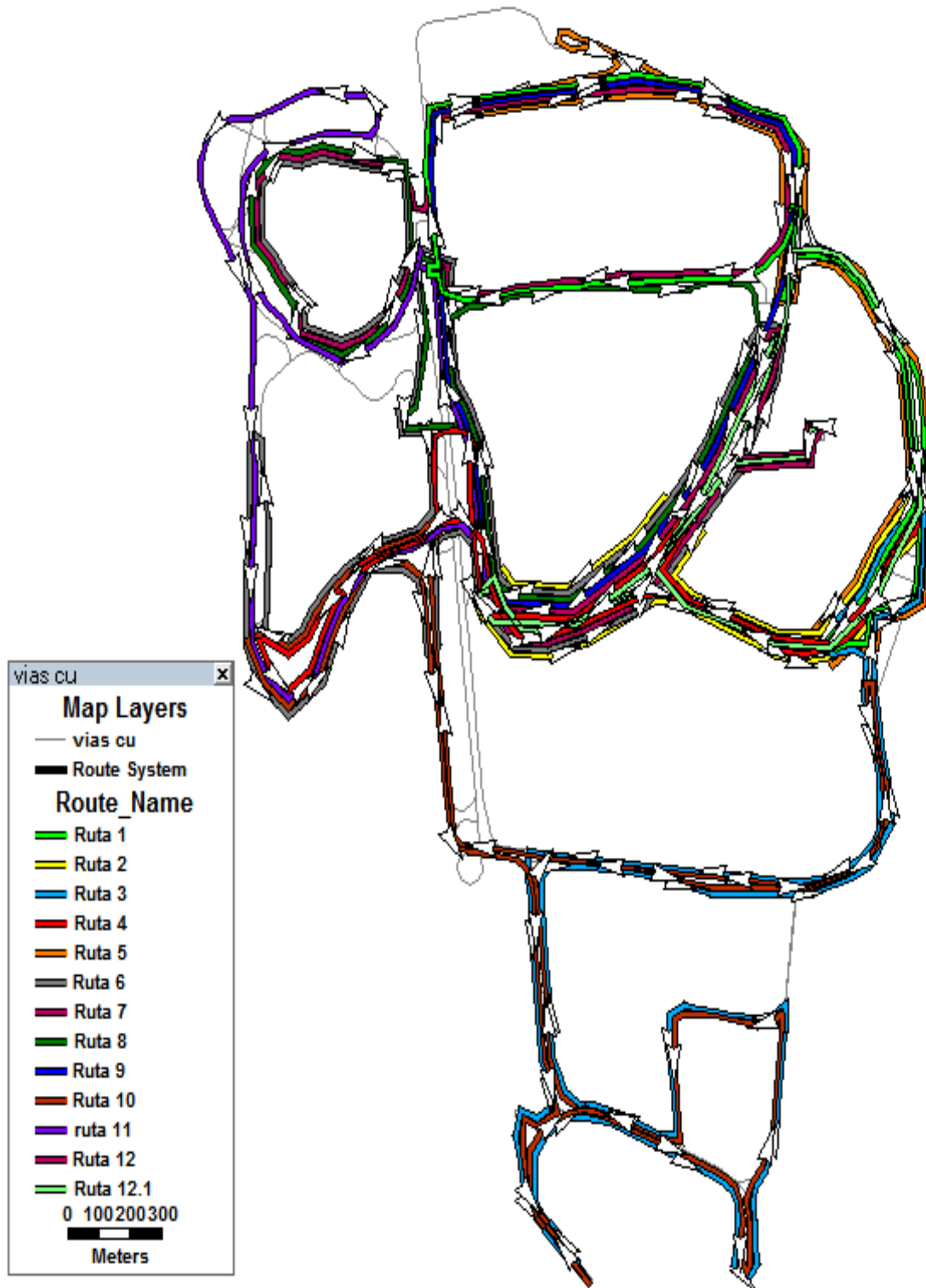


Figura 2.14 Rutas Pumbús



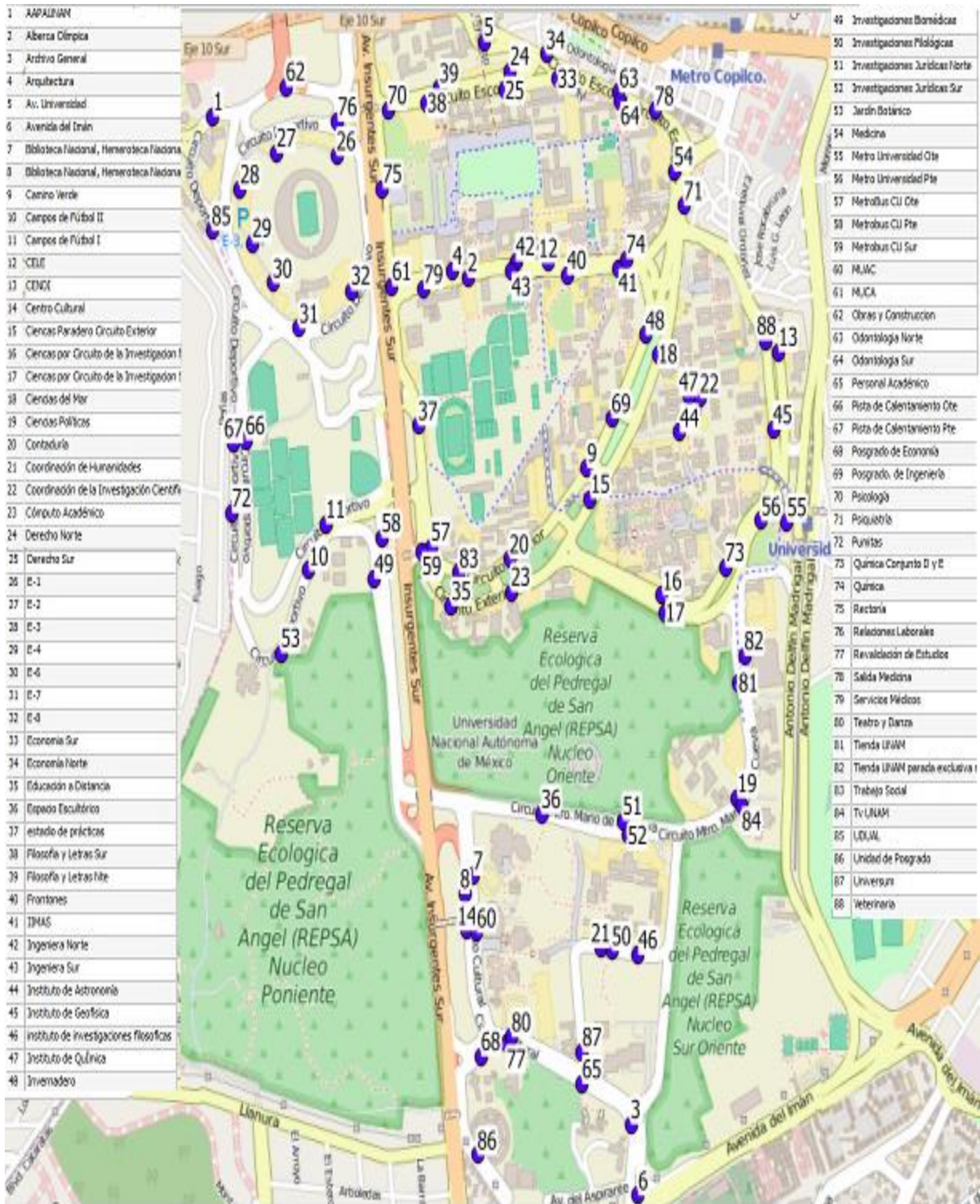


Figura 2.15 Paradas del Pumabús

### 2.3.1 Flota vehicular

El Sistema de Transporte Interno Pumabús proporcionó información sobre la cantidad de vehículos existentes por cada tipo de vehículo y su capacidad de asientos; la capacidad total del vehículo se consultó en la página web de cada una de las marcas. Es importante mencionar que estas capacidades cambian y dependen de la configuración de los asientos, por ende, no se asegura que sea la capacidad actual de cada uno de los vehículos, pero es un aproximado realista.

Cantidad	Año	Marca	Tipo	Capacidad	
				Sentados	Total
5	2002	International	Autobús	27	60
11	2004	International	Autobús	37	68
9	2013	International	Autobús	41	100
5	2009	International	Autobús	47	113
1	2002	Mercedes Benz	Autobús	16	30
5	2002	Mercedes Benz	Autobús	26	70
13	2007	Mercedes Benz	Citaro	33	98
3	2007	Mercedes Benz	Autobús	37	70
1	2005	Mercedes Benz	Autobús	39	70
3	2008	Mercedes Benz	Autobús	41	70

*Tabla 2.3.1 –Flota Vehicular del Sistema de Transporte Interno Pumabús*

### 2.3.2 Frecuencias

Las frecuencias de las rutas del Pumabús fueron proporcionadas por el GiiTral (con base en información del Sistema de Transporte Pumabús), información que fue extraída de los datos registrados por los GPS de los vehículos del año 2014. En la figura 2.3.1 se muestran las frecuencias promedio para cada ruta en diferentes periodos del día para días típicos, es decir, martes, miércoles y jueves; en esta gráfica se observa que las rutas que presentan las frecuencias más altas son las rutas que tienen como terminal alguna de las dos estaciones aledañas al Metro Ciudad Universitaria (Metro CU oriente y poniente). La ruta 2 siempre presenta la mayor frecuencia, alcanzando su máximo entre las 6 a 9 horas y su mínimo entre las 9 a 15 horas, aunque esta ruta es una de las rutas más cortas de CU es importante porque transporta a los usuarios del Metro CU hacia la parte sur del circuito exterior y que además presenta el porcentaje más alto de demanda (ver tabla 2.1). En el periodo de las 6 a 9 horas, las frecuencias más bajas se presentan en las rutas 10, 11 y 12, al observar el recorrido de estas rutas en la sección 2.2., destaca que son rutas que sólo atienden a una estación de transporte

público externo a CU: la estación Metrobús Ciudad Universitaria, por ende, se espera que no contengan gran afluencia de pasajeros en horarios de máxima atracción o generación de viajes por CU, por lo que se requiere una frecuencia mínima para prestar el servicio. Al comparar el segundo y el tercer intervalo de tiempo (9 a 15 horas y 15 a 19 horas, respectivamente), se observan una fuerte disminución en las frecuencias de las rutas 10 y 11, y paulatinamente, las frecuencias de las rutas 1 y 5 se incrementan, este suceso se debe a que en horas de máxima demanda las unidades de las rutas con menor demanda pasan a apoyar rutas con mayor carga de pasajeros (la ruta 1 y 5 presenta mayor porcentaje de utilización que las rutas 10 y 11, ver tabla 2.1).

A partir de las frecuencias se obtiene el intervalo de paso (minutos/autobús) para cada ruta (ver tabla 2.3.3), de lo cual se evidencia que el tiempo de espera es menor para horas de la mañana, sin embargo, son lapsos de tiempo considerablemente amplios.

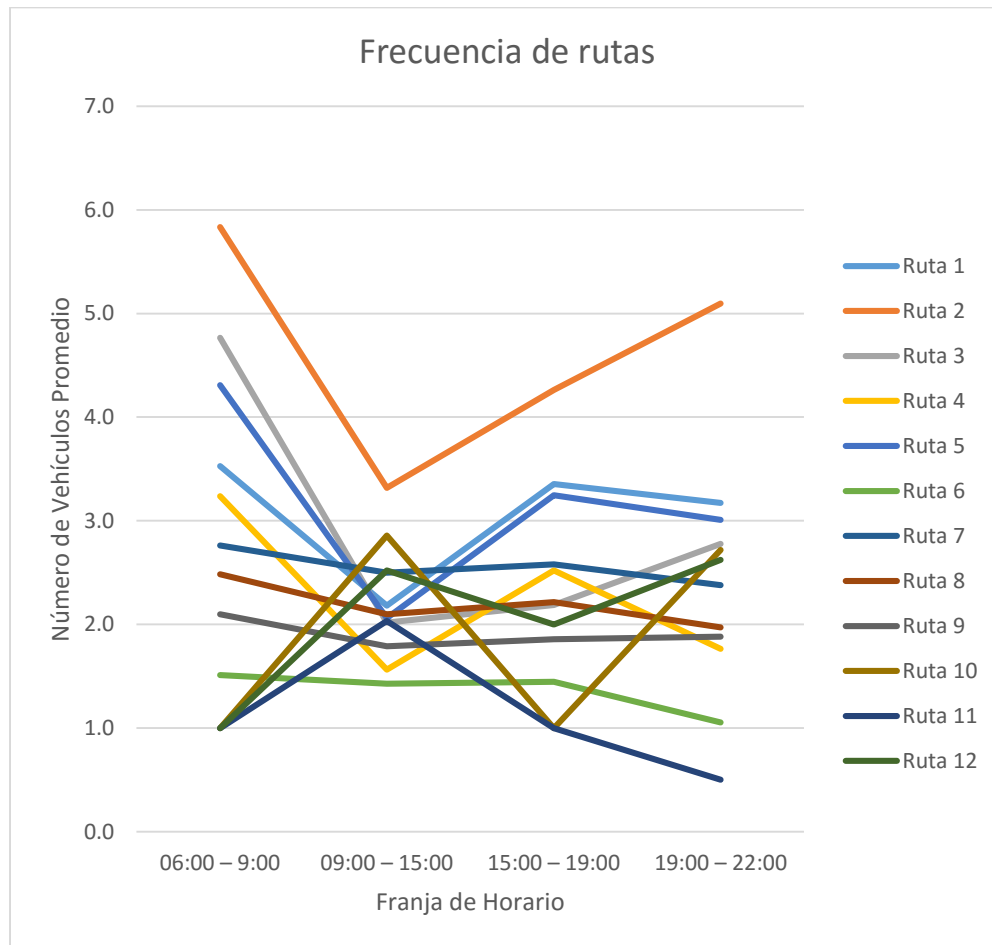


Figura 2.3.1 Frecuencias del Sistema de Transporte Interno Pumabús

## 2.4 Estimación de horas de máxima demanda del Sistema de Transporte Interno Pumabús

Milioti y Karlaftis (2014) afirman que el análisis de demanda es de vital importancia para una toma de decisiones eficiente en el sistema de transporte público (expansión de la red de transporte, políticas de precios, subsidios y decisiones de operación).

Dado que no existen estudios sobre la demanda del sistema Interno de Transporte Pumabús, se decidió identificar las horas de máxima demanda a partir de la información proporcionada por la encuesta Origen-Destino de la Zona Metropolitana del Valle de México del año 2007, la cual es la información más reciente al momento.

Ruta	06:00 – 9:00	09:00 – 15:00	15:00 – 19:00	19:00 – 22:00
Ruta 1	3.5	2.2	3.4	3.2
Ruta 2	5.8	3.3	4.3	5.1
Ruta 3	4.8	2.0	2.2	2.8
Ruta 4	3.2	1.6	2.5	1.8
Ruta 5	4.3	2.1	3.2	3.0
Ruta 6	1.5	1.4	1.4	1.1
Ruta 7	2.8	2.5	2.6	2.4
Ruta 8	2.5	2.1	2.2	2.0
Ruta 9	2.1	1.8	1.9	1.9
Ruta 10	1.0	2.9	1.0	2.7
Ruta 11	1.0	2.0	1.0	0.5
Ruta 12	1.0	2.5	2.0	2.6

Tabla 2.3.2 –Frecuencias de las Rutas del Sistema de Transporte Interno Pumabús (Autobuses/ Hora)

Ruta	06:00 – 9:00	09:00 – 15:00	15:00 – 19:00	19:00 – 22:00
Ruta 1	17.0	27.5	17.9	18.9
Ruta 2	10.3	18.1	14.1	11.8
Ruta 3	12.6	29.7	27.4	21.6
Ruta 4	18.5	38.4	23.8	34.0
Ruta 5	13.9	29.1	18.5	19.9
Ruta 6	39.7	42.0	41.5	56.9
Ruta 7	21.7	24.0	23.2	25.2
Ruta 8	24.1	28.6	27.1	30.4
Ruta 9	28.6	33.6	32.3	31.9
Ruta 10	60.0	21.0	60.0	22.1
Ruta 11	60.0	29.5	60.0	120.0
Ruta 12	60.0	23.8	30.0	22.9

Tabla 2.3.3 –Intervalos de Paso de las Rutas del Sistema de Transporte Interno Pumabús (Minutos/Autobús )

Las consultas sobre la base de datos de la encuesta se realizaron para el número de AGEB (Área Geo-Estadística Básica) de Ciudad Universitaria (0900300010770), esta AGEB incluye también una zona habitacional de 280 personas (incluye población adulta e infantil ) según información del SCINCE 2010: Sin embargo, para fines prácticos suponemos que la información acerca de los viajes, en la matriz Origen- Destino para ésta AGEB, corresponde en su totalidad a Ciudad Universitaria, debido a que el tamaño de la población de la AGEB es no significativo en comparación con la cantidad de personas que estudian o trabajan en Ciudad Universitaria.

Los datos extraídos de la matriz Origen-Destino del año 2007 se actualizaron al año 2015 por el método de factor de crecimiento, puesto que no existían datos para realizarlo mediante otro método como la regresión lineal. El factor de crecimiento se consideró de acuerdo al porcentaje de incremento de población Universitaria: estudiantes, docentes y empleados en general. La población de estudiantes no contiene los estudiantes inscritos en programas de estudio a distancia. Dado que la única información disponible es la matriz Origen-Destino del año 2007, el factor de crecimiento se calculó como la razón entre la población universitaria del año en curso (2015) y el año 2007.

Año	Estudiantes	Personal	Total
2007	169,611	76,566	246,177
2008	174,959	77,986	252,945
2009	180,381	78,309	258,690
2010	187,519	80,027	267,546
2011	189,212	81,041	270,253
2012	196,042	82,003	278,045
2013	172,455	84,062	256,517
2014	176,803	85,146	261,949
2015	184,849	86,603	271,452

*Tabla 2.4 –Población de Ciudad Universitaria. Fuente: Dirección General de Planeación (2015)*

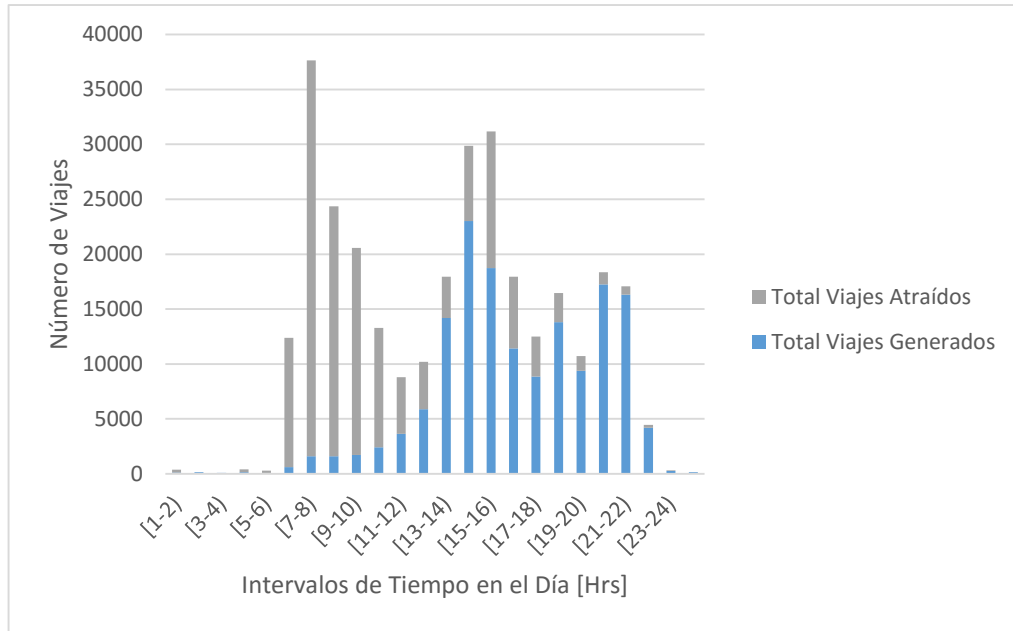
El factor de crecimiento se calculó mediante la siguiente formula:

$$f = \frac{p(2015)}{p(2007)} = 1.10266806 \quad (2.1)$$

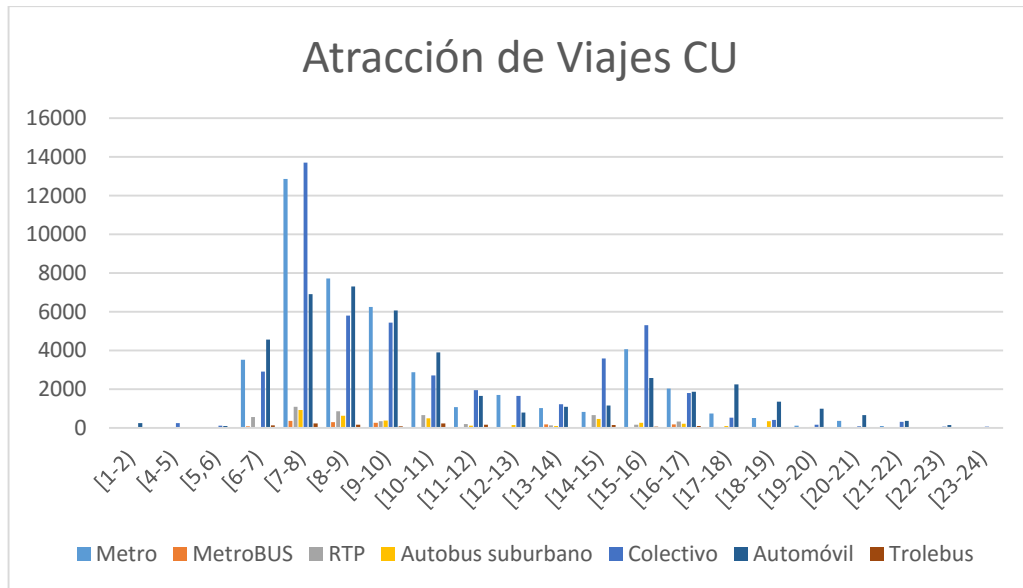
Considerando los viajes atraídos y generados por Ciudad Universitaria, se observa que las horas en las cuales se presenta mayor afluencia de personas trascurren entre las 7 a 8 horas y entre las 15 a 16 horas. Entre las 7 a 8 horas la mayor proporción de viajes son viajes de atracción (viajes que tienen por destino CU) y entre las 15 a las 16 horas la mayor proporción de los viajes son viajes generados (viajes que tienen por origen CU), por lo que se infiere que una proporción

importante de la población universitaria inicia sus jornadas laborales o estudiantiles entre las 7 a 8 horas y finaliza sus labores entre las 15 a las 16 horas (ver figura 2.4.1).

Al analizar la atracción y generación de viajes por cada uno de los modos de transporte, se observa que los modos prevalentes para las horas de máxima afluencia son: Metro, colectivos y automóvil (ver figura 2.4.2 y 2.4.3)

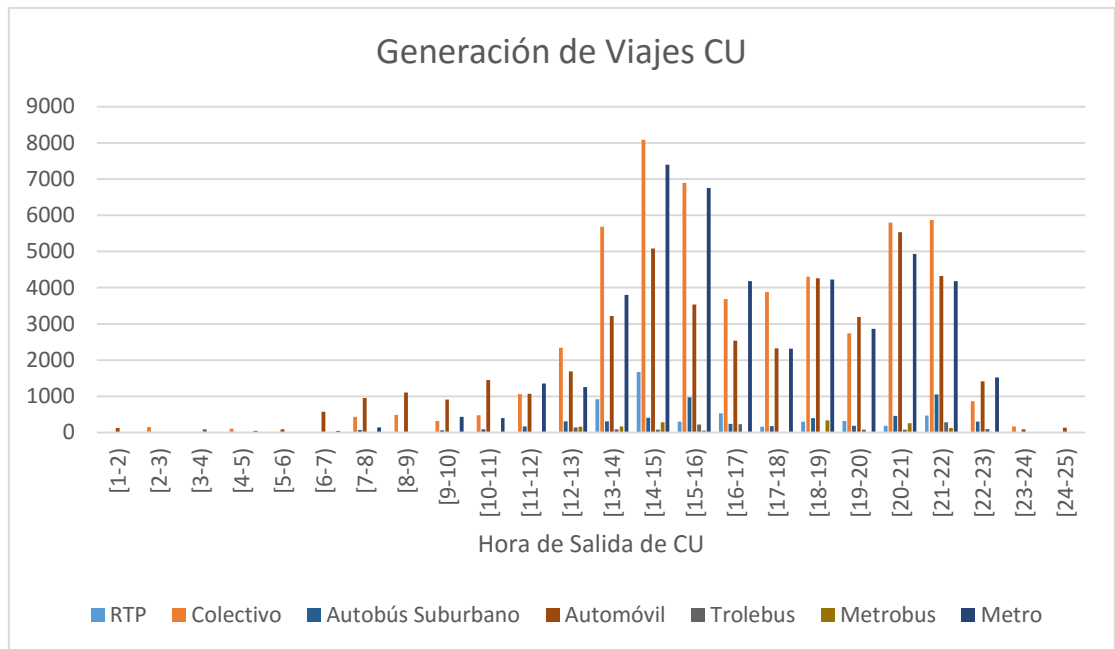


**Figura 2.4.1 Viajes Atraídos y Generados por CU**



**Figura 2.4.2 Atracción de Viajes CU**





**Figura 2.4.3 Generación de Viajes CU**

La demanda potencial del Sistema Interno Pumabús es el número de viajes atraídos y generados por la AGEB de Ciudad Universitaria entre las 7 a 8 horas y entre las 15 y las 16 horas, si se espera que cada uno de los usuarios que llegan o salen de Ciudad Universitaria utiliza el Sistema de Transporte Interno Pumabús. No obstante, también existe un porcentaje de personas que prefiere caminar o tomar Bicipuma para trasladarse entre su origen y su destino (ambos dentro de Ciudad Universitaria). Para estimar este porcentaje se realizó una encuesta de forma presencial y que además se compartió vía Google Drive, en la cual se obtuvieron 50 respuestas, de las cuales se obtuvo que aproximadamente el 66.66% de las personas deciden transportarse utilizando el Sistema de Transporte Pumabús, el 1.96% utiliza el modo de transporte Bicipuma y el 31% restante realiza sus recorridos a pie; sin embargo, esta información no es representativa, ya que se deberían realizar 465 encuestas para obtener información con el 95% de confianza y un error del 3%, a pesar de esto esta información obtenida es utilizada como base para la obtención de la matriz Origen-Destino Interna de viajes realizados en Pumabús.



### 3. OBTENCIÓN DE LA MATRIZ ORIGEN-DESTINO DE CIUDAD UNIVERSITARIA

En este capítulo se presenta una breve introducción a las metodologías comúnmente utilizadas para la obtención de la matriz origen-destino. Posteriormente se presenta la metodología utilizada para la creación de la matriz origen- destino (OD) de CU, para la cual fue necesario utilizar herramientas como la teoría de utilidad y el proceso analítico jerárquico. Los procedimientos utilizados para generar la matriz OD de CU que se describen en esta sección fueron programados en Visual Basic for Applications (VBA). Finalmente se presentan los mapas de las líneas de deseo de viajes al interior de CU generados en TransCAD.

#### 3.1 Introducción

La matriz origen-destino interna es necesaria para identificar los patrones de viajes que se realizan dentro de CU, ésta se debe representar mediante una tabla que ordena en filas y columnas, el resultado de viajes generados desde un origen (nodo i) hacia un destino (nodo j). Las filas corresponden a los sitios donde se genera el viaje (orígenes) y las columnas corresponden a los sitios donde el viaje termina (destinos), las celdas representan el número de viajes que se realizan del nodo origen al nodo destino en determinado tiempo.

Una de las formas de obtener la matriz origen-destino es mediante encuestas origen- destino, las cuales permiten obtener información acerca de los motivos de viaje, modos utilizados, tiempo empleado para realizar los viajes, entre otros atributos. Las etapas necesarias para este estudio son: preparación de la encuesta, aplicación de la encuesta, captura y validación de la encuesta, expansión de la muestra y procesamiento de los resultados (Molinero Molinero y Sánchez Arrellano 1997).

En la etapa de preparación de una encuesta origen-destino local para transporte público, se hace necesario realizar la delimitación de la zona de estudio a tratar y la zonificación bajo criterios de homogeneidad; estas zonas deben estar limitadas por la red de transporte público y contener sus paradas principales, a menor tamaño de zona, menor grado de error. En esta etapa también se define el tipo de muestreo a realizar, éste puede ser muestreo aleatorio simple o muestreo aleatorio estratificado; el primero considera la variación presente en los viajes a lo largo del día y el segundo, la variación en horas o días, los tamaños de muestra están determinados por las ecuaciones 3.1 y 3.2, respectivamente (Molinero Molinero y Sánchez Arrellano 1997).

$$n * k = \frac{N * K * C^2}{C^2 + (N * K * (\frac{d}{z})^2)} \quad (3.1)$$

$$K = \frac{K * C_W^2}{\left[ (\frac{d}{z})^2 * K + (K * C_b^2) \right] + C_W^2 - K * C_b^2} \quad (3.2)$$

Donde:

k: Número de viajes por autobús muestreados.

n: Número de días por muestrear.

K: Número de viajes programados por día.

N: Número de días de la temporada analizada.

C: Coeficiente de variación (0.35 valor recomendado para México).

d: Precisión deseada expresada como una fracción de la media.

z: Estadístico normal para el nivel de confianza deseado.

$C_w^2$ : Coeficiente de variación horaria equivalente a C.

$C_b^2$ : Coeficiente de variación entre diferentes días de la semana.

Es de vital importancia identificar el tamaño de muestra apropiado para garantizar resultados fiables (Parra y Padilla 2003).

En cuanto a la etapa de diseño del cuestionario, es importante que el cuestionario esté conformado por preguntas secuencialmente lógicas, referentes al origen, destino y posteriormente preguntas complementarias. El cuestionario debe ser claro y conciso, es necesario que se realicen pruebas piloto para poder hacer las mejoras necesarias en cuanto a vocabulario y estructura para un mayor grado de entendimiento (Molinero Molinero y Sánchez Arrellano 1997).

En la etapa de aplicación de la encuesta es necesario elaborar un programa de trabajo que especifique las rutas a ser encuestadas, el número de encuestas a realizar y el equipo de trabajo necesario para la encuesta. Este programa permitirá definir los requerimientos de material y personal encuestador. Adicionalmente, en esta etapa es necesario capacitar al encuestador de forma práctica y teórica con el fin de disminuir el grado de error de la encuesta (Molinero Molinero y Sánchez Arrellano 1997).

En cuanto a la etapa de codificación, captura y validación, se tiene que la primera hace referencia al proceso de introducir los identificadores numéricos para la zona origen y la zona destino conforme a la zonificación previamente definida, una vez se ha realizado este procedimiento se organiza la información relativa a los folios y se verifica la calidad de la información recabada. La captura de información es el ingreso de la información obtenida en las encuestas a un sistema de cómputo para un posterior procesamiento y expansión de la muestra. El proceso de expansión se realiza con el objetivo de obtener un universo de viajes,

los factores que se pueden considerar son: las frecuencias observadas, la expansión por hora del día, expansión por motivo de viaje, expansión conjunta de motivo y hora del día, la no respuesta y los periodos de expansión (Molinero Molinero y Sánchez Arrellano 1997).

Finalmente, en la etapa de procesamiento de resultados, la información que se puede obtener a partir de la matriz origen - destino depende del diseño de la encuesta y de los objetivos con los que se planeó el estudio. La información se puede clasificar de la siguiente forma: información relativa a los desplazamientos de la población que muestra básicamente los flujos entre cada par origen-destino, información que describe el comportamiento de la demanda sobre la red que son reportes sobre ascensos y descensos por parada, polígonos de carga y afluencia de pasajeros en cada una de las paradas, y por último índices operativos del sistema como la ocupación por unidad, velocidad de operación, intervalo de paso, captación por kilómetro, distancia recorrida por el usuario, transbordos, etc. (Molinero Molinero y Sánchez Arrellano 1997).

Entre las limitaciones que este método de obtención de matrices origen- destino está la gran cantidad de tiempo y recursos económicos invertidos en su ejecución (Lozano, Torres, y Antún, 2003).

Sin embargo, también se puede realizar una estimación de la matriz origen- destino utilizando resultados de estudios origen-destino anteriores (matriz origen- destino base) para años posteriores, las herramientas que se utilizan para la estimación de la nueva matriz origen-destino se dividen principalmente en dos categorías: la primera es mediante factor de crecimiento y la segunda modelos sintéticos (algunos de ellos abordados en el capítulo 1). En cuanto al factor de crecimiento, se basa en el supuesto que la distribución de viajes en el futuro será similar a la actual, los métodos más comunes en esta categoría son el método de factor uniforme, método del factor promedio, el método Fratar, el método Detroit y el método Furness. Respecto a los métodos sintéticos, éstos obtienen una serie de características de los viajes de las tablas O-D actuales y a partir de éstas puede predecirse la distribución futura, entre ellos están el modelo de gravedad, el modelo electrostático, el modelo de oportunidades, el modelo de regresión lineal múltiple (Estrada Perea 2008). A partir de una matriz origen-destino general y un modelo Logit de selección de modos de transporte se puede obtener la matriz origen-destino por modo.

Una forma de estimar la matriz origen-destino para viajes de vehículos, son los aforos de tránsito. Los aforos son estudios que miden la cantidad de vehículos que transitan por determinado punto. Hay aforos permanentes y los aforos para los cuales se realizan mediciones sólo para algunos días del año. Los aforos dan como resultado la composición vehicular, que son los porcentajes de tipos de vehículos asignados a una categoría dada, en el caso del transporte público este estudio da información acerca de las frecuencias de las rutas y de sus

respectivas cargas. Dicho tipo de estudio posee la ventaja de ser sencillo y ofrecer buenas estimaciones (Gómez 1991).

Actualmente CU no cuenta con ningún estudio que dé información acerca de los viajes realizados en su interior, la única información disponible es la matriz origen-destino para la Zona Metropolitana del Valle de México 2007, que da información de los viajes atraídos y generados por CU (viajes externos) para cada uno de los modos de transporte público de México y en vehículos particulares como moto o automóvil. Los viajes externos en transporte público inician o terminan en estaciones externas a CU, es decir los modos de transporte público de México no tienen acceso al CU; por ejemplo los viajes atraídos o generados en colectivos llegan o parten desde alguna de las estaciones de colectivo ubicadas en la periferia de CU.

A partir de la información origen-destino de los viajes externos a CU, se desea obtener la matriz origen- destino interna de CU de viajes realizados en Pumabús para cada una de las horas de máxima demanda identificadas en el capítulo 2. El determinar el número de viajes que se generan o son atraídos en cada una de estaciones externas a CU permite conocer el origen o el destino del viaje a realizar dentro de CU. Dado que el objetivo es obtener la matriz origen-destino de viajes que se realizan en Pumabús, se considera que las paradas de este sistema de transporte son los nodos origen o los nodos destino.

### **3.2 Determinación de la demanda de cada nodo**

En el caso de los viajes atraídos en el X modo de transporte, la demanda o el total de viajes que llegan a cada uno de los nodos destino se calculó como el producto entre el total de viajes atraídos en el modo X y el porcentaje de la población universitaria en cada nodo. Por población universitaria se entiende el personal académico, laboral y estudiantil. De igual forma para el caso de los viajes generados, el total de viajes que salen de cada nodo se calculó como el producto entre el total de viajes generados en el modo de transporte X y el porcentaje de población universitaria de cada nodo. Para el cálculo de la población universitaria de cada nodo se consideró la cantidad de personal académico, trabajadores y estudiantes de cada una de las facultades, edificios e institutos cercanos, así por ejemplo la población de la parada Contaduría está conformada por una proporción de población de la facultad de contaduría y administración y del edificio Dirección General de Cómputo. La asignación de los porcentajes de población de cada facultad, instituto o edificio a cada parada aledaña se realizó de forma proporcional, por ejemplo la población de la Facultad de Contaduría y Administración se dividió entre las paradas “Contaduría” y “Cómputo Académico” por ser las más cercanas y tener direcciones diferentes, es decir se consideró que no todos los viajes se realizan en la misma dirección, estas paradas a la vez contienen porcentajes de la población de edificios como la “Dirección General de Cómputo”. Para el caso de la Escuela Nacional de Trabajo Social, su población se dividió proporcionalmente a la cantidad de paradas inmediatamente cercanas y de dirección diferente, “Trabajo Social”, “Metrobús Ote” y “Metrobús Sur”, debido a la ubicación de las salidas de esta

facultad, es decir hay una salida aleadaña a la parada Metrobús Oriente y otra aleadaña a la parada Trabajo Social (ver figura 3.1). En la tabla 3.1 se presenta el porcentaje de población de cada nodo con relación a la población total del campus universitario. La información acerca de la población en cada facultad, edificio o instituto se obtuvo en la Dirección General de Personal.

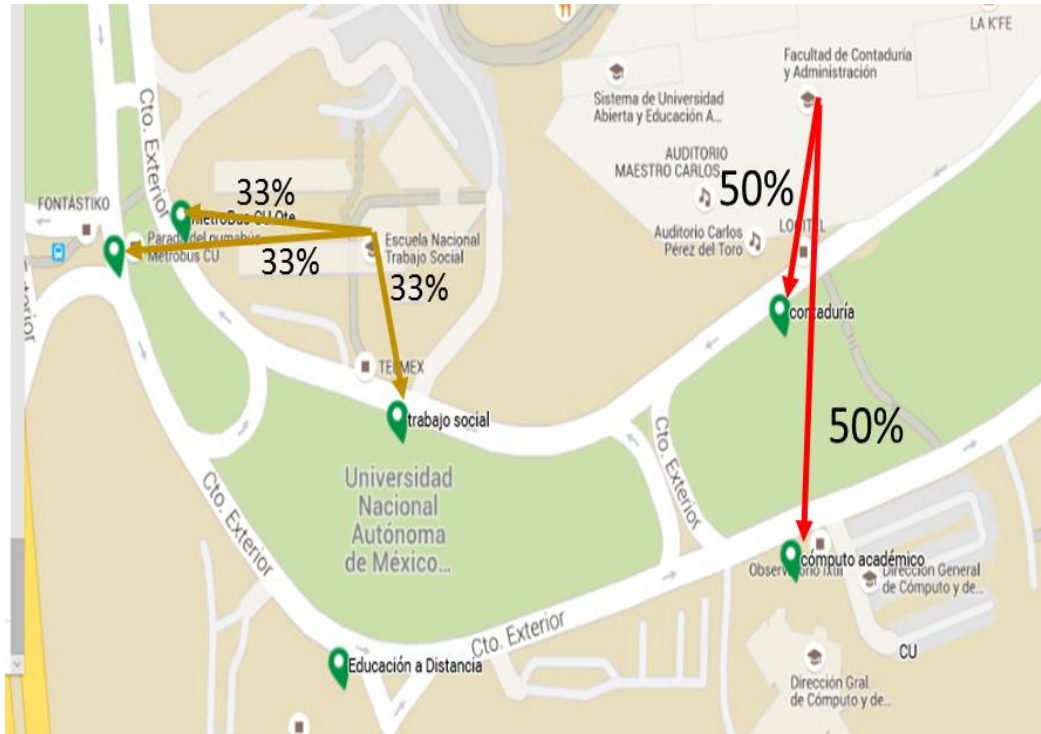


Figura 3.1 Asignación de población a cada parada

Parada	Población	Porcentaje
AAPAUNAM	444	0%
Alberca Olímpica	4873	3%
Archivo General	2816	2%
Arquitectura	4873	3%
Avenida Universidad	462	0%
Camino verde	6599	4%
Campos de Fútbol I	300	0%
Campos de Fútbol II	300	0%
CELE	708	0%
CENDI	3611	2%
Centro Cultural	636	0%
Ciencias del Mar	647	0%
Ciencias Paradero Circuito Exterior	12353	7%
Ciencias Políticas	5203	3%

Ing. Sonia Marcela Cifuentes Martínez  
TESIS DE MAESTRÍA

Parada	Población	Porcentaje
Ciencias Por Circuito de la Investigación Nte	68	0%
Ciencias Por Circuito de la Investigación Sur	68	0%
Cómputo Académico	9055	5%
Contaduría	8436	5%
Coordinación de Humanidades	589	0%
Derecho Norte	5369	3%
Derecho Sur	5369	3%
Economía Norte	3124	2%
Economía Sur	3689	2%
Educación A Distancia	58	0%
Espacio Escultórico	406	0%
Facultad de Química	2971	2%
Filosofía y letras Norte	5573	3%
Filosofía y letras Sur	5573	3%
Frontones	201	0%
Hemeroteca Nacional Ote	109	0%
Hemeroteca Nacional Pte	109	0%
IIMAS	3545	2%
Ingeniería Nte	5265	3%
Ingeniería Sur	5265	3%
Instituto de Astronomía	1276	1%
Instituto de Geofísica	786	0%
Instituto de Química	471	0%
Investigación Científica	253	0%
Investigaciones Biomédicas	300	0%
Investigaciones Filológicas	276	0%
Investigaciones filosóficas	248	0%
Investigaciones Jurídicas Nte	1046	1%
Investigaciones Jurídicas Sur	1359	1%
Jardín Botánico	749	0%
Medicina	21113	12%
Metro Universidad Ote	184	0%
Metro Universidad Pte	184	0%
Metrobús CU Sur	1081	1%
Metrobús CU Ote	1024	1%
MUAC	677	0%
MUCA	203	0%
Obras y construcción	920	1%
Odontología Norte	2038	1%
Odontología Sur	2038	1%
Personal Académico	482	0%
Posgrado de Ingeniería	1085	1%
Posgrado en Economía	239	0%
Psicología Norte	2573	1%
Psicología Sur	2573	1%
Psiquiatría	421	0%

Parada	Población	Porcentaje
Química Conjunto D y E	2187	1%
Rectoría	1076	1%
Revalidación de Estudios	83	0%
Servicios médicos	408	0%
Tienda UNAM	779	0%
Tienda UNAM Exclusiva	2714	2%
Trabajo Social	1024	1%
TV UNAM	5203	3%
Unidad de Posgrado	1633	1%
Universum	2	0%
Veterinaria	3822	2%
Relaciones laborales	274	0%
Invernadero	156	0%
Metrobús Pte	300	0%
Teatro y danza	83	0%
Total	172007	100%

*Tabla 3.1 –Porcentaje de población de paradas del pumabús.*

### 3.3 Asignación de viajes a estaciones externas

De la matriz origen-destino de la zona metropolitana del Valle de México, conocemos el total de personas que ingresan (viajes atraídos) y egresan (viajes generados) de CU en los diferentes modos de transporte (Metro, colectivo, RTP, entre otros); pero no se tiene información acerca de las estaciones en las cuales los usuarios finalizan o inician sus recorridos externos a CU, por ende, no se conocen los orígenes o los destinos de los viajes realizados dentro de CU. Por ejemplo, un usuario del sistema de transporte Metro que tiene por destino CU, tiene dos opciones, terminar su viaje en la estación Copilco o en la estación Metro Universidad; ambas estaciones se encuentran ubicadas en la periferia de CU, dependiendo donde decida el usuario terminar su viaje, se determinan los posibles orígenes para iniciar su viaje al interior de CU; si un usuario decide terminar su viaje externo en la estación Copilco, entonces las posibles paradas en las cuales inicia su recorrido al interior de CU son Odontología, Medicina o Salida de Medicina; pero si decide terminar su viaje en la estación Metro Universidad, entonces las posibles paradas en las cuales inicia su recorrido al interior de CU son Metro Universidad Oriente o Metro Universidad Poniente. Como se explicará más adelante, se consideran las paradas que se encuentran a una distancia cercana que pueda ser recorrida a pie. En el caso de los viajes generados en CU, por ejemplo, un estudiante de cualquier facultad que desee realizar un viaje con origen CU hacia un destino cualquiera de la Ciudad de México en el modo de transporte trolebús, tiene dos opciones, abordar en la estación de trolebús cercana al Estadio Olímpico o en la estación ubicada en la Avenida Universidad, dependiendo de la decisión que tome, se determinan los posibles destinos de su viaje interno, que tiene por origen una parada del Pumabús cercana a su facultad.



Por lo anterior, se hace necesario realizar la distribución del total de viajes atraídos o generados de CU por cada modo de transporte, entre las respectivas estaciones que se encuentran en la periferia de CU, propias del modo de transporte. A continuación, se presentan las posibles estaciones (estaciones externas) donde el usuario puede descender o abordar cada modo de transporte (ver imagen 3.2):

- **Metro:** Estación Metro Copilco y Estación Metro Universidad.
- **Colectivo:** Estación Avenida Universidad, Estación Avenida del Imán, Estación Metro Copilco y Estación Metro Universidad.
- **Metrobús:** Estación Doctor Gálvez, Estación Metrobús Universidad y Estación Centro Cultural.
- **RTP:** Estación Metro Universidad y Estación Avenida Universidad.
- **Trolebús:** Estación Trolebús Estadio Olímpico y Estación Avenida Universidad.
- **Autobús Suburbano:** Estación ubicada al interior de CU cercana al estadio de Prácticas.

Con respecto a los viajes que son atraídos o generados por Ciudad Universitaria en modos de transporte como moto, taxi, o bicicleta, se asume que llegan a su destino final dentro de CU utilizando este mismo modo, ya que en el caso de moto o bicicleta la universidad ha destinado espacios para que lo estudiantes o visitantes estacionen estos vehículos, por lo anterior estos viajes no harán parte de la matriz origen-destino interna. También, se consideran los viajes atraídos y generados en automóvil, la elaboración de la matriz origen-destino interna de viajes atraídos y generados en automóviles se presenta en la sección 3.3.5.



Figura 3.2 Estaciones de Transporte Público Externo de CU

Para la asignación de viajes atraídos o generados por cada modo a cada una de las estaciones posibles de transporte público externo a CU se realizó la analogía con el Problema P-Mediana; en este problema el objetivo es encontrar la “mejor” ubicación para  $p$ -número de plantas que sirven a  $n$  puntos de demanda, con el objetivo de minimizar el total de las distancias ponderadas, el modelo se presenta a continuación:

$$\text{Minimizar } \sum_i \sum_j h_i d_{ij} Y_{ij} \quad (3.3)$$

Sujeto a:

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (3.4)$$

$$\sum_j X_j = p \quad (3.5)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i, j \quad (3.6)$$

$$X_j = 0,1 \quad \forall j \quad (3.7)$$

$$Y_{ij} = 0,1 \quad \forall i, j \quad (3.8)$$

Donde

$h_i$ = demanda del nodo  $i$

$d_{ij}$ = distancia entre el nodo  $i$  y la planta  $j$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si la planta ubicada en } j \text{ atiende al nodo } i \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{Si una planta es ubicada en } j \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

La primera restricción (ecuación 3.4) busca que la demanda de cada nodo  $i$  sea satisfecha. La segunda restricción (ecuación 3.5) establece que  $p$ -plantas deben ser localizadas. La tercera restricción (ecuación 3.6) obliga a asignar los nodos demanda sólo a plantas abiertas. En cuanto a la cuarta restricción (ecuación 3.7), establece que las variables de localización sean binarias. La última restricción (ecuación 3.8) obliga a asignar cada nodo demanda a una sola planta, en este caso a la más cercana, además que puede cambiar a  $Y_{ij} \geq 0$  sólo sí existe diferencia entre los costos unitarios de transporte a los que hay lugar entre un nodo demanda y cada una de las plantas, entonces la asignación a cada una de las plantas puede ser parcial.

El resultado de utilizar este modelo es la obtención de la mejor ubicación para cada una de las plantas y simultáneamente se obtiene la decisión de qué planta provee a cada cliente dado.

Sin embargo, para la asignación de viajes atraídos o generados de cada modo a cada una de las estaciones posibles no es necesario ubicar las estaciones “las plantas”, puesto que éstas ya existen y su localización no se puede cambiar, tan sólo es necesario asignar las paradas Pumabús con su respectiva demanda a las estaciones externas. En el problema básico de la P-

Mediana, como ya se explicó anteriormente cada nodo demanda se asigna a la estación más cercana; no obstante, para algunos de los viajes realizados dentro de CU no se considera la distancia como único criterio, también se tienen en cuenta otros criterios que conforman una función objetivo multicriterio (estos criterios serán descritos en el siguiente apartado).

### 3.3.1 Criterios de asignación

El criterio de asignación de viajes a cada una de las estaciones externas se realizó de acuerdo a tres criterios:

- $D_{ij}$ =Distancia euclidiana entra la estación externa  $i$  y la parada del Pumabús  $j$ . Se utilizó la distancia en línea recta puesto que utilizar las distancias determinadas por las direcciones de las vías de CU implicaría suponer que todos los viajes internos se realizan en Pumabús, además la distancia en línea recta es un estimado de la distancia del viaje percibida por el usuario y con base en la cual toma la decisión sobre a qué estación externa dirigirse.
- $A_i$ = Accesibilidad de la estación externa  $i$ , tomando el término “accesibilidad” para hacer referencia al número de paradas del Pumabús a menos de trescientos metros. Se consideró este criterio bajo el razonamiento de que entre mayor sea el número de paradas cercanas a una estación, más atractiva será para el usuario porque probablemente cerca a esta estación transiten más rutas y por lo tanto hay mayor frecuencia de autobuses.
- $T_i$ = Tipo de Estación  $i$ , que hace referencia a si una estación de transporte externo en cuestión es o no terminal. Se considera este criterio por cuanto se espera que los usuarios prefieran abordar un determinado modo de transporte en una estación donde inicia la ruta, al ser los primeros usuarios en ingresar al sistema puede que haya más probabilidad de encontrar un asiento disponible para realizar su viaje, este comportamiento en la generación de viajes se supone similar en la atracción de viajes.

La información acerca del criterio  $T_i$  y  $A_i$  para cada estación se muestra en la tabla 3.2.

Estación Externa	Número de paradas a menos de 300 metros	Estación de Transporte Externo
Estación Metro Copilco	1	2(No terminal)
Estación Metro Universidad	2	1 (Terminal)
Estación Avenida Universidad	4	2 (No terminal)
Estación Trolebús Estadio Olímpico	1	1 (Terminal)

*Tabla 3.2 –Criterios estaciones externas.*

Sin embargo, el último de los criterios mencionados no aplica para los viajes atraídos y generados por el modo de transporte Metrobús (BRT, Bus Rapid Transit), puesto que de las tres

estaciones consideradas (Doctor Gálvez, Universidad y Centro Cultural), ninguna es un terminal de la Línea 1 del Metrobús, para este caso se consideró la afluencia de cada estación como criterio sustituto al de tipo de estación, considerando que la afluencia puede dar información acerca del grado de seguridad de una estación, se asume que entre mayor sea el número de usuarios más cuidada es la estación. Así pues, la estación con mayor afluencia tiene grado de seguridad 1, la segunda estación con mayor afluencia tiene grado de seguridad 2 y la tercera estación con mayor afluencia tiene grado de seguridad 3 (ver tabla 3.3).

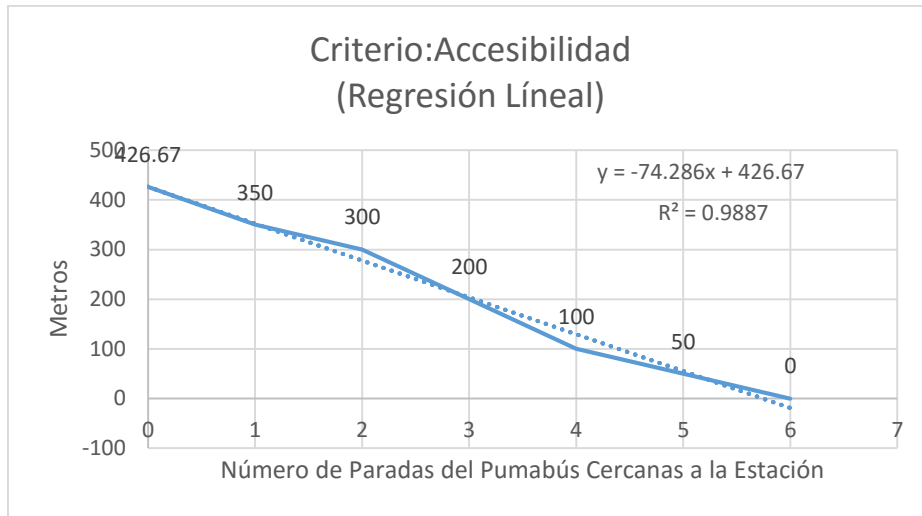
Estación	Número de paradas a menos de 300 metros	Afluencia en Pasajeros(SEGURIDAD)(“Metrobús,” 2014)
Estación Metrobús CU	6	5,629 (2°)
Estación Metrobús Doctor Gálvez	0	17,847 (1°)
Estación Metrobús CCU	4	2,000 (3°)

*Tabla 3.3 –Criterios estaciones externas Metrobús.*

Para obtener una función objetivo en términos de los tres criterios:  $D_{ij}$ ,  $A_i$  y  $T_i$  fue necesario unificar escalas, para ello se hizo uso de la Teoría de Utilidad. Para los criterios de accesibilidad, tipo de estación y grado de seguridad se recurrió a las siguientes preguntas, respectivamente: dado un número determinado de paradas del Pumabús cercanas a su estación del Sistema de Transporte Externo por medio del cual se transporta, ¿Cuántos metros está dispuesto a recorrer para llegar a su destino sin utilizar el Pumabús?, ¿Cuántos metros está dispuesto a caminar hacia la terminal del sistema de transporte externo que utiliza, si usted tiene mayor probabilidad de que encontrará un asiento disponible para su viaje? Y ¿Cuántos metros está dispuesto a recorrer para abordar o finalizar su recorrido en una estación con mayor seguridad? Estas preguntas deben ser formuladas a los usuarios de los sistemas de transporte público para así, identificar sus patrones de decisión, sin embargo, en este caso se realizó bajo supuestos para probar el procedimiento, los resultados obtenidos se muestran en las figuras 3.3., 3.4. y en la tabla 3.4.

De la tabla 3.4. se concluye que un usuario está dispuesto a recorrer 400 metros hacia una estación de transporte público tipo terminal, en la cual inicia el recorrido externo (se asume que este patrón se mantiene para viajes atraídos). De la figura 3.3. se observa que, dadas seis paradas aledañas a una estación externa, el usuario no está dispuesto a caminar hasta su destino final, por cuanto espera que dada la cantidad de paradas haya una ruta que lo pueda llevar hasta su destino. Se procede bajo el mismo razonamiento para figura 3.4.

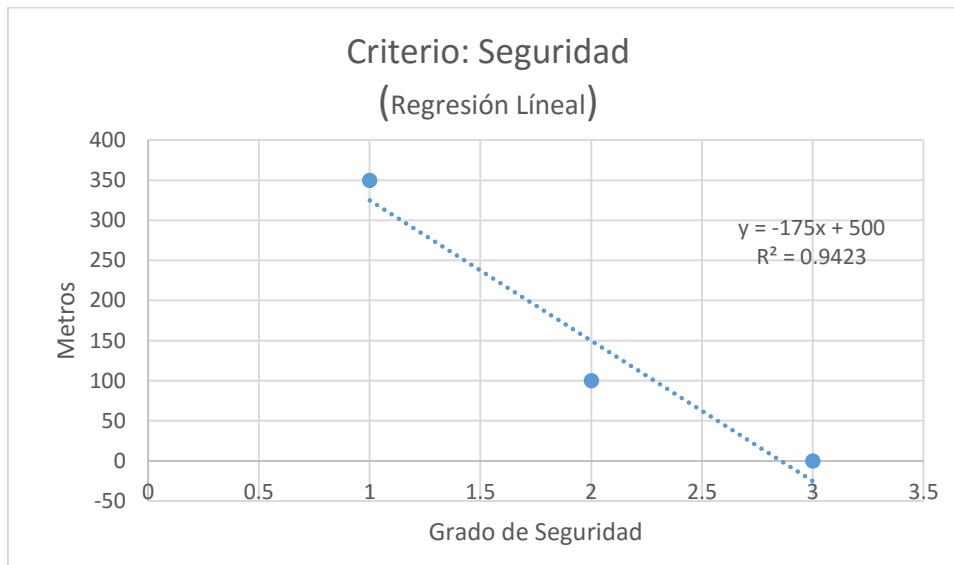
Las lecturas de las figuras 3.3., 3.4. y de la tabla 3.4. determinan el equivalente en metros por cada valor de cada criterio, finalmente se tiene la escala de todos los criterios a utilizar unificada en metros (ver tabla 3.5.).



**Figura 3.3. Equivalencia en metros del criterio accesibilidad**

Tipo de Estación	Metros
Terminal	400
No Terminal	0

**Tabla 3.4. –Equivalencia en metros del criterio: tipo de estación.**



**Figura 3.4. Equivalencia en metros del criterio seguridad.**

Estación	Accesibilidad	Terminal	Seguridad
Estación Metro Copilco	350	0	
Estación Metro Universidad	300	400	
Estación Metrobús Centro Cultural	100		0
Estación Metrobús CU	0		100
Estación Metrobús Doctor Gálvez	426.67		350
Estación Avenida Universidad	100	0	
Estación Trolebús Estadio Olímpico	350	400	
Estación Avenida el Imán	300	0	

*Tabla 3.5. –Equivalencia de criterios.*

**Nota:** No se considera la estación de Autobuses Suburbanos, puesto que sólo existe la opción de abordar o descender de este medio de transporte en la única estación existente para ello.

### 3.3.2 Proceso analítico jerárquico

Se realizó un proceso analítico jerárquico para obtener los pesos a utilizar en la función multicriterio considerada como una función de costo generalizado, es importante mencionar que este proceso debe ser realizado por expertos o bajo la aplicación de encuestas que permitan identificar el grado de importancia que dan los usuarios a cada uno de los criterios, sin embargo, en este caso se realizó bajo supuestos para probar el procedimiento. A continuación, se describe el proceso.

#### 1. Matrices de comparación de criterios:

La comparación de criterios se realizó de acuerdo a la escala propuesta por Saaty y Vargas (2001) mostrada en la tabla 3.6. luego, la matriz de comparación entre los criterios para la asignación de viajes realizados en el transporte público de México a cada una de las estaciones aledañas a CU se muestra en la tabla 3.7.

El criterio accesibilidad se considera moderadamente más importante que criterio distancia, ya que en una estación en la cual hay más paradas cercanas (paradas a una distancia menor a 300 metros), hay mayor probabilidad de que más rutas transiten por la zona y por lo tanto mayor probabilidad de al menos una ruta brinde el servicio de transporte hacia el destino final del usuario sin transferencias. En caso contrario, si el usuario se encuentra en la estación más cercana al destino final, pero con baja accesibilidad, el número de rutas será reducido y el tiempo de espera posiblemente sea mayor y la probabilidad de encontrar una ruta que brinde servicio hacia su destino es escasa. El criterio tipo de estación se considera extremadamente más importante que la distancia, puesto que se espera que un viaje exterior de Ciudad Universitaria sea más extenso que la espera por un autobús del Pumabús, por esta misma razón el criterio tipo de estación se considera preponderante frente al criterio accesibilidad. De igual forma se razonó para la comparación de criterios de viajes realizados en Metrobús (Tabla 3.8).

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia.	Dos actividades contribuyen por igual al objetivo.
3	Importancia moderada de un elemento sobre otro.	La experiencia y el juicio están a favor de un elemento sobre otro.
5	Importancia fuerte de un elemento sobre otro.	Un elemento es fuertemente favorecido.
7	Importancia muy fuerte de un elemento sobre otro.	Un elemento es muy dominante.
9	Extrema importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es favorecido por al menos un orden de magnitud de diferencia.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	Se usan como compromiso entre dos juicios.
Incrementos 0,1	Valores intermedios en incrementos.	Utilización para graduación más fina de juicios.

Tabla 3.6. –Escala de Comparación de Saaty. Fuente: Saaty y Vargas (2001)

Proceso analítico jerárquico			
	Distancia	Accesibilidad	Tipo de Estación
Distancia	1.00	0.33	0.11
Accesibilidad	3.00	1.00	0.14
Tipo de estación	9.00	7.00	1.00

Tabla 3.7. –Matriz de comparación de criterios.

Proceso analítico jerárquico - Metrobús			
	Distancia	Accesibilidad	Seguridad
Distancia	1.00	0.20	0.50
Accesibilidad	5.00	1.00	3.00
Seguridad	2.00	0.33	1.00

Tabla 3.8. – Matriz de Comparación de criterios de viajes en Metrobús.

- Una vez que se tiene la matriz de comparaciones R, el siguiente paso es normalizarla, es decir cada celda de la matriz se divide entre la suma de su respectiva columna (ecuación 3.9).

$$Norma(c_{ij}) = \frac{c_{ij}}{\sum_i c_{ij}} \quad (3.9)$$



Matriz Normalizada			
	Distancia	Accesibilidad	Tipo de Estación
Distancia	0.08	0.04	0.09
Accesibilidad	0.23	0.12	0.11
Tipo de Estación	0.69	0.84	0.80

Tabla 3.9. –Matriz normalizada de comparación de criterios.

3. Estimar el vector de pesos ( $w$ ) calculando el promedio de cada fila de la matriz normalizada (ecuación 3.10).

$$w_i = \frac{\sum_j c_{ij}}{3} \quad (3.10)$$

Criterio	Wi
Distancia	0.069
Accesibilidad	0.155
Tipo de estación	0.777

Tabla 3.10. –Ponderación de criterios.

4. Comprobar la consistencia de los juicios con base en el radio de convergencia ( $R_c$ ) mediante la ecuación 3.11.

$$R_c = \frac{IC}{IA} \quad (3.11)$$

- Si  $RC = 0$ , la matriz es consistente.
- Si  $RC \leq 0.10$ , la matriz  $R$  tiene una inconsistencia admisible, lo que significa que se le considera consistente y el vector de pesos obtenidos se admite como válido.
- Si  $RC > 0.10$ , la inconsistencia es inadmisibles y se aconseja revisar los juicios.

El índice de consistencia ( $IC$ ) está definido por la ecuación 3.12

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3.12)$$

Donde  $\lambda_{max}$  es el vector propio máximo de la matriz  $R$  se obtiene mediante la ecuación 3.13 y  $n$  el número de criterios, en este caso  $n=3$ .

$$R * \hat{W} = \lambda_{max} * \hat{W} \quad (3.13)$$

Así, al multiplicar la matriz R por el vector  $\hat{w}$  (vector de pesos estimado) se obtiene un vector columna, luego cada componente de éste se divide por las componentes del vector  $\hat{w}$  y se genera otro vector columna formado por los valores propios de la matriz R, el promedio de estos valores propios es  $\lambda_{max}$ , en este caso  $\lambda_{max} = 3.08$

IA es el índice aleatorio, este índice es obtenido mediante la simulación de 100,000 matrices recíprocas generadas aleatoriamente utilizando la escala de Saaty y Vargas (2001). A continuación, se presenta la tabla de los índices aleatorios en función del tamaño de la matriz (ver tabla 3.11).

Tamaño de la Matriz	2	3	4	5	6	7	8	9
Índice Aleatorio	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

Tabla 3.11. – Índices Aleatorios de Saaty. Fuente: Saaty y Vargas (2001)

En este caso la matriz es de tamaño  $n=3$ , por lo tanto, IA es 0,58.

El índice de convergencia para esta matriz es de  $0.07 \leq 0.10$ , la matriz R tiene una inconsistencia admisible, por lo tanto el vector de pesos obtenidos se admite como válido.

El anterior proceso se aplica para la matriz de comparación de criterios del Metrobús, obteniéndose el vector de ponderaciones mostrado en la tabla 3.12. El índice de convergencia para la matriz de comparación de criterios de viajes atraídos o generados en Metrobús es de  $0.003 \leq 0,10$ , entonces la matriz R tiene una inconsistencia admisible, por lo tanto el vector de pesos obtenidos se admite como válido.

Criterio	Wi
Distancia	0.12218196
Accesibilidad	0.64794686
Seguridad	0.22987118

Tabla 3.12. –Ponderación de criterios de viajes en Metrobús.

### 3.3.3 Definición de signos de la ponderación de los criterios en la función objetivo

Dado que la función objetivo está definida como una función objetivo de costo se debe analizar si los criterios determinan en realidad un costo o no, si el criterio contribuye al costo el signo de su ponderación será positivo mientras que si el criterio genera un beneficio en el confort del viaje externo el signo de la ponderación será negativo. Así, las ponderaciones en la función objetivo de los criterios tipo de estación y grado de seguridad de una estación tendrán signo negativo puesto que al llegar a una estación tipo terminal o a una estación más segura se

considera que los viajes serán más confortables. Con respecto al criterio accesibilidad, éste también se considera como un criterio que genera un beneficio en el viaje interno (por posible reducción en el tiempo de espera y de viaje). Sin embargo, si se observa la figura 3.3, cuando una estación externa cuenta con cero paradas del Pumabús aledañas equivale a caminar aproximadamente 426 metros hacia su destino dentro de CU, el considerar el criterio accesibilidad con signo negativo en la función de costo generalizado implica que el peor escenario (0 paradas del Pumabús aledañas) represente un beneficio porque disminuye el costo, y el mejor escenario (6 paradas del Pumabús aledañas) sea indiferente. Por lo anterior, el criterio accesibilidad se consideró con signo positivo en la función de costo generalizado.

$$w = 0.0685 * D_{ij} + 0.1548 * A_i - 0.7765 * T_i \quad (3.14)$$

$$w_{\text{Metrobús}} = 0.122 * D_{ij} + 0.6479 * A_i - 0.2298 * S_i \quad (3.15)$$

### 3.3.4 Asignación

Una vez obtenidas las funciones multicriterio se realiza la asignación de viajes de cada modo de transporte a cada una de las estaciones externas posibles. Sin embargo, no siempre las decisiones serán guiadas por esta función, dado que hay circunstancias propias de un viaje que obligan a realizar el viaje hasta la estación más cercana al destino final (dentro de CU) o en el caso de los viajes generados, realizar el viaje externo desde la estación más cercana a la parada donde se encuentra el usuario. Así, se define las siguientes variables:

$d_{i1}$  = Distancia entre el nodo  $i$  a asignar y la estación externa primera más cercana

$d_{i2}$  = Distancia entre el nodo  $i$  a asignar y la estación externa segunda más cercana

Sólo se hará uso de la función multicriterio si la diferencia entre estas dos variables es menor que cuatrocientos metros, se fijó este parámetro porque es la mayor distancia que se está dispuesto a recorrer en el análisis realizado para la unificación de escalas.

El resultado hasta el momento es la asignación de viajes por cada uno de los modos de transporte a alguna de sus posibles estaciones, por ejemplo, para el caso de viajes atraídos en el modo de transporte Metrobús, la cantidad de viajes para cada una de sus tres estaciones posibles se muestra en la tabla (3.13).

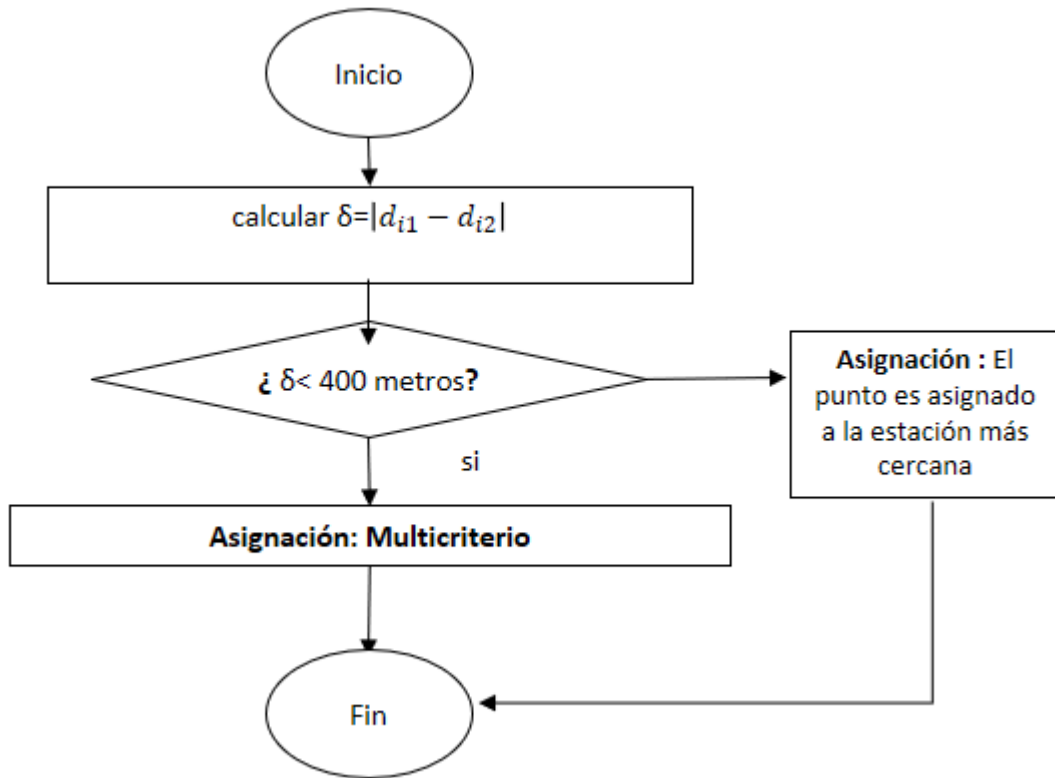


Figura 3.5. Asignación de viajes.

Viajes totales Asignados a la estación <i>i</i>	
Estación Metrobús Centro Cultural	19
Estación Metrobús CU	302
Estación Metrobús Doctor Gálvez	85

Tabla 3.13. –Asignación de viajes atraídos en Metrobús a las estaciones del Metrobús.

### 3.3.5 Asignación de viajes atraídos o generados en automóvil particular

De los viajes atraídos o generados por CU en automóvil se considera que existe un porcentaje de estos viajes que llegan directamente a su destino dentro de CU, como es el caso de los viajes realizados por el personal académico y administrativo, puesto que existen estacionamientos cercanos a cada dependencia para su uso exclusivo, el porcentaje restante de viajes deben acudir a un estacionamiento público (de estudiantes y visitantes), estos usuarios posteriormente deben hacer uso de algún modo de transporte (Bicipuma, caminar o Pumabús) para trasladarse desde el estacionamiento donde dejaron su automóvil hacia su destino final dentro de CU o en el caso de viajes generados, deben trasladarse desde su lugar de estudio o

de trabajo al estacionamiento donde dejaron su automóvil al llegar, por ende el porcentaje de viajes en automóvil que deben utilizar un estacionamiento público es el que se utilizará para la generación de esta matriz origen-destino de CU. El porcentaje de viajes que llegan directamente a su destino final dentro de CU fue estimado como la proporción existente de la población académica y laboral con respecto a la población universitaria total de CU, esto es aproximadamente el 34%, así el 34% de los viajes atraídos o generados en automóvil llegan o salen directamente de su lugar de trabajo, mientras que el 66% deben utilizar un estacionamiento público.

Adicional a ese 34%, se omite también el porcentaje de viajes en vehículo que son atraídos con el propósito de recoger o dejar a alguien (ver tabla 3.14) con relación al total de viajes atraídos, toda vez que estos vehículos no hacen uso de los estacionamientos públicos, porque su ingreso a CU es por tan sólo unos minutos.

Intervalo	Número de Viajes atraídos Con el propósito de dejar o recoger a alguien
[6-7)	489
[7-8)	852
[8-9)	884
[9-10)	88
[10-11)	91
[14-15)	82
[15-16)	482
[17-18)	73
[18-19)	440
[19-20)	93
[20-21)	396
[21-22)	225

*Tabla 3.14–Viajes Atraídos en vehículo con propósito de recoger o dejar a una persona.*

Para la asignación de los viajes en automóvil a los diferentes estacionamientos públicos de CU, es necesario hacer la conversión de unidades, esto es convertir el número de viajes en número de vehículos; lo anterior se realizó al dividir tanto los viajes atraídos como generados por el factor que determina cuantas personas en promedio viajan en un automóvil cuando se tiene por origen o por destino a CU, este factor se logró determinar en 1.2636 [pas/veh] a partir de la Matriz Origen-Destino de la Zona Metropolitana del Valle de México. Finalmente, el número de vehículos que hace uso de los estacionamientos públicos se muestran en la tabla 3.15. Es importante mencionar que aun con el cálculo de estas cifras (usuarios potenciales del pumabús) las horas identificadas como horas de máxima demanda se mantienen.

Intervalo	Generados	Atraídos
[1-2)	47	115
[2-3)	0	
[3-4)	0	
[4-5)	0	
[5-6)	21	49
[6-7)	174	1577
[7-8)	358	2398
[8-9)	486	2374
[9-10)	431	2410
[10-11)	538	1428
[11-12)	404	663
[12-13)	664	278
[13-14)	1412	388
[14-15)	2100	452
[15-16)	1523	721
[16-17)	918	683
[17-18)	809	772
[18-19)	1688	337
[19-20)	1305	350
[20-21)	2288	51
[21-22)	1670	53
[22-23)	536	24
[23-24)	20	
[24-25)	63	

*Tabla 3.15–Viajes atraídos y generados en vehículos que usan estacionamientos públicos.*

Ciudad Universitaria cuenta con 24 estacionamientos públicos controlados y también cuenta con estacionamientos no controlados en la calle (ver figura 3.6- líneas rosas), para referenciar geográficamente los estacionamientos no controlados se hizo uso del punto medio de cada trazo y su capacidad se obtuvo mediante el cociente entre la distancia total disponible para estacionarse entre el tamaño longitudinal de un vehículo promedio (4.3 metros). En la tabla 3.16., se muestra la capacidad de cada uno de los 32 estacionamientos.





<b>Etiqueta</b>	<b>Estacionamiento</b>	<b>Capacidad</b>
<b>1</b>	E-1	389
<b>2</b>	E-2	389
<b>3</b>	E-3	389
<b>4</b>	E-4	389
<b>5</b>	E-6	388
<b>6</b>	E-7	388
<b>7</b>	E-8	388
<b>8</b>	Estacionamiento Alberca Olímpica	195
<b>9</b>	Estacionamiento Campos Punitas	200
<b>10</b>	Estacionamiento CEPE	115
<b>11</b>	Estacionamiento Ciencias	170
<b>12</b>	Estacionamiento Estadio de Prácticas	110
<b>13</b>	Estacionamiento Ingeniería	400
<b>14</b>	Estacionamiento Investigaciones Filológicas	124
<b>15</b>	Estacionamiento Medicina	200
<b>16</b>	Estacionamiento MUCA	130
<b>17</b>	Estacionamiento Odontología	172
<b>18</b>	Estacionamiento Público 3	320
<b>19</b>	Estacionamiento Público 4	380
<b>20</b>	Estacionamiento Química	140
<b>21</b>	Estacionamiento Tienda UNAM	291
<b>22</b>	Estacionamiento Torre de Ingeniería-frontones	140
<b>23</b>	Estacionamiento Trabajo Social	104
<b>24</b>	Estacionamiento Universum	198
<b>25</b>	Referencia Copilco (fuera de CU)	94
<b>26</b>	Referencia Estacionamiento Cómputo Académico	246
<b>27</b>	Referencia Estacionamientos Campos de Fútbol	287
<b>28</b>	Referencia Investigación Científica	179
<b>29</b>	Referencia Investigación Científica 2	586
<b>30</b>	Referencia Museo Universitario de Arte Contemporáneo	218
<b>31</b>	Referencia Posgrado de Odontología	677
<b>32</b>	Referencia Universum	198
	<b>Total</b>	<b>8594</b>

*Tabla 3.16–Capacidad de estacionamientos públicos de CU.*

El criterio de asignación de viajes a cada uno de los estacionamientos se realizó únicamente con el criterio de distancia determinada por el sentido de las vías de CU, así el total de viajes atraídos o generados en automóvil por cada parada del Pumabús se calcula como el producto entre su porcentaje de población universitaria (tabla 3.1) y el número de automóviles atraídos o generados en la hora de máxima demanda correspondiente (Tabla 3.15). En la figura 3.7. se presenta el seudocódigo de asignación de viajes atraídos y generados por cada parada del Pumabús a cada uno de los estacionamientos entre la hora X y X+1 del día, el seudocódigo se

programó en Visual Basic y se corrió para las horas de máxima demanda, es decir hasta  $X=7$  horas (primera hora de máxima demanda comprendida entre las 7 a 8 horas) y  $X=15$  horas (segunda hora de máxima demanda comprendida entre las 15 a 16 horas). El pseudocódigo presentado toma en cuenta el estado de la capacidad del sistema, producto del ingreso y egreso de automóviles en horas anteriores, contando a partir de las cero horas.

En la fila 1 se inicia el ciclo desde la 1 am hasta el inicio del intervalo de tiempo a modelar. De la fila 2 a la 7 se extraen los viajes generados de cada parada del Pumabús, estos viajes extraídos representan los viajes que se realizan de cada parada del Pumabús hacia cada uno de los estacionamientos a los cuales se les asignaron viajes en  $t-1$ , de igual forma las capacidades restantes de los estacionamientos se actualizan, al ser viajes generados se liberan cupos. Entre las líneas 8 a la 14, los viajes atraídos en la hora  $t$  por cada una de las paradas son asignados al estacionamiento  $p$  más cercano, sin importar que la capacidad de este estacionamiento sea nula, la variable  $A_p$  es el contador de automóviles que se ingresan a cada uno de los estacionamientos. De la fila 15 a la 20 se inicia un contador de estacionamientos que sobrepasan su capacidad, la fila 21 establece que si el número de estacionamientos con sobrecupo es mayor que uno, entonces se procede a reasignar la cantidad de viajes que superan la capacidad del estacionamiento, de la fila 22 a la 34 se reasigna el sobrecupo de cada estacionamiento al estacionamiento segundo más cercano cuya capacidad no haya sido excedida en forma proporcional a los viajes que se asignaron de cada una de las paradas, una vez realizada la reasignación el contador de los estacionamientos con sobrecupo se reduce en una unidad y si el estacionamiento segundo más cercano al cual se le reasignaron los viajes ha sobrepasado su capacidad el contador se incrementa en una unidad. Hasta aquí se tiene la asignación de los viajes tanto generados como atraídos por las paradas del Pumabús a cada uno de estacionamientos, como se mencionó para la asignación de automóviles a los diferentes estacionamientos, se hizo necesaria la conversión de número de viajes a número de vehículos, ahora como se trata de viajes individuales internos, en modos de transporte internos, se hace necesario obtener el número de personas que viajan, para ello se multiplican los datos por 1.2636 [pas/veh].

### **3.4 Matriz origen-destino por modo de transporte**

Los viajes asignados a las estaciones de cada uno de los modos de transporte externos fueron a su vez asignados a las paradas internas del Pumabús que se encuentran a una distancia en línea recta menor o igual a 428 metros (paradas origen o destino del viaje interno), este parámetro se fijó de acuerdo a las distancias promedio que los peatones están dispuestos a caminar según Ortiz, Esquivel, y Hernández (2012). Sin embargo, los resultados no fueron coherentes, como por ejemplo a los viajes que llegan o salen de la estación Metro Universidad se les asignaba como posible nodo origen o nodo destino paradas como “Química Conjunto D

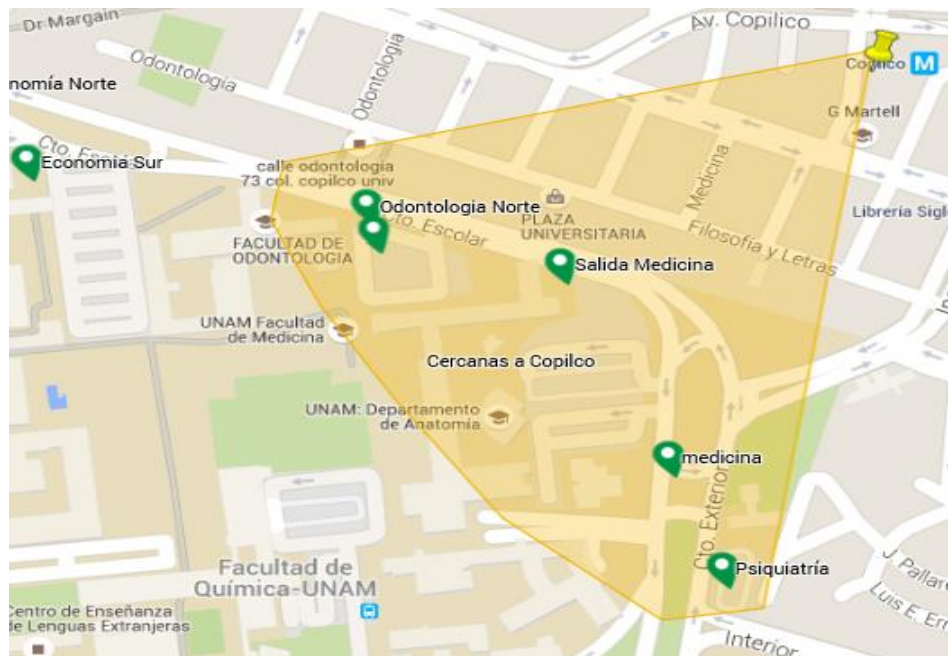
y E”, lo cual no es consistente porque no es posible que una persona que ingrese por Metro CU se traslade hasta esta parada para iniciar su viaje dentro de CU, dado que es una distancia considerablemente mayor que las distancias entre el Metro Ciudad Universitaria y las paradas Metro CU poniente u oriente, en las cuales se puede abordar las mismas rutas que se abordan en la parada “Química Conjunto D y E ; otro ejemplo incoherente por la razón expuesta es la asignación de la parada “Psiquiatría” como posible nodo origen o destino de los viajes atraídos o generados por la estación Metro Copilco (ver figura 3.8).

```
1. For t= 1 to X (de 1 am a X horas)
2. If t<>1 then
3.   Demanda Paradai = Total Viajes Generadost * % población Paradai
4.   Vzi = %viajes asignados al estacionamiento zt-1 * Demanda Paradai
5.   Capacidad Estacionamiento Z = Capacidadt-1 + Vzi
6. Else
7. End if
8. For i = 1 to 82
9.   Demanda Paradai = Total Viajes Atraídost * % población Paradai
10.  Asignaciónip = 1
11.  AsigEstacionamientot = AsigEstacionamientot + Demanda Paradai
12.  Aip = Demanda Paradai
13.  Ap = Ap + Demanda Paradai
14. Next i
15. For p=1 to 32
16.  If Ap>CEp Then
17.    R=R+1
18.  Else
19.  End if
20. Next p
21. Do while R>0
22.  For p= 1 to 32
23.    If Ap> CEp then
24.      For i = 1 to 82
25.        If Asignaciónip = 1 then
26.          Reasignarip = (Ap - CAp) * (Aip/AsigEstacionamientot)
27.          R=R-1
28.          if A2p > C2p then
29.            R=R+1
30.          Else
31.            End if
32.          End if
33.        Next i
34.      Next p
35.    Loop
36.  Next t
```

**Figura 3.7 Seudocódigo asignación de viajes atraídos y generados en automóvil**

Por lo anterior se decidió reducir el radio de asignación a 370 metros, a excepción de las estaciones de Metrobús Doctor Gálvez y Estación Metro Universidad. Para la estación de Metrobús Doctor Gálvez el tener 428 metros de radio implicaba la no asignación de nodos origen o destino, es decir no podía contener viajes con origen o destino CU, lo que se

contradice con la realidad, por lo cual se asignó un radio de 800 metros, puesto que es el mínimo necesario para cubrir paradas del Pumabús como Avenida Universidad, Derecho Norte, Filosofía Sur y Norte, Obras y Construcción, Psicología y Relaciones Laborales, que son las paradas que se espera que si su personal decide realizar un viaje en Metrobús desde o hacia CU lo hagan desde o hacia la estación Doctor Gálvez. En cuanto a la estación Metro Universidad se trabajó con un radio de 200 metros, lo necesario para cubrir únicamente las estaciones Metro Universidad Oriente O Metro Universidad Poniente. Los posibles nodos origen o destino para cada estación externa se presentan en la tabla 3.17, el conjunto de nodos de cada estación es llamado conjunto de nodos atractivos de la estación en cuestión.



**Figura 3.8 Determinación de nodos origen o destino.-**

En cuanto a las paradas asignadas a cada estacionamiento, el radio de asignación de nodos origen o nodos destinos fue de 100 metros para estacionamientos ubicados en el Estadio Olímpico de CU, a excepción del estacionamiento E4 para el cual se cree necesario que los viajes deben llegar tanto a la parada E4 como UDUAL, la elección depende en la dirección en la que va el viaje lo cual se ve reflejado en la distancia. Para el resto de los estacionamientos el radio de asignación de nodos origen o nodos destinos fue de 160 metros.

Ing. Sonia Marcela Cifuentes Martínez  
**TESIS DE MAESTRÍA**

<b>Estación</b>	<b>Nodos o Destinos</b>
<b>Estación Metro Copilco</b>	Medicina
	Odontología Norte
	Salida Medicina
<b>Estación Metro Universidad</b>	Metro Universidad Oriente
	Metro Universidad Poniente
<b>Estación Metrobús Centro Cultural</b>	Biblioteca Nacional, Hemeroteca Nacional Oriente
	Biblioteca Nacional, Hemeroteca Nacional Poniente
	Centro Cultural
	MUAC
<b>Estación Metrobús CU</b>	Campos fútbol 1
	Educación a Distancia
	Investigaciones Biomédicas
	Metrobús CU Oriente
	Metrobús CU Poniente
	Metrobús CU Sur
<b>Estación Metrobús Doctor Gálvez</b>	Avenida Universidad
	Derecho Norte
	Filosofía sur
	Filosofía norte
	Obras y construcción
	Psicología
	Relaciones laborales
<b>Estación Avenida Universidad</b>	Av. Universidad
	Derecho Norte
	Derecho Sur
	Economía Sur
	Economía Norte
	Filosofía y Letras Sur
	Filosofía y Letras Nte
<b>Parada Trolebús Estadio Olímpico</b>	AAPAUNAM
	Obras y Construcción
	Relaciones Laborales
<b>Estación Avenida el Imán</b>	Archivo General
	Avenida del Imán
<b>Estación Buses Interurbanos</b>	Estadio de Prácticas
	Servicios Médicos
	Metrobús Oriente

*Tabla 3.17 –Nodos origen o destino de las estaciones externas.*

Finalmente, el número de viajes atraídos y generados por cada una de las paradas del Pumabús por cada modo de transporte (obtenidas en la sección 3.2) se les asigna como nodo origen (viajes atraídos) o nodo destino (viajes generados) la parada del Pumabús más cercana del conjunto de nodos atractivos de la misma estación a la cual fue asignando en la sección 3.3.4. Hasta aquí se tiene el volumen de viajes por modo de transporte entre cualquier par de nodos  $i$  y  $j$ .

### **3.5 Matrices origen-destino interna por modo de transporte: "posibles usuarios del Pumabús"**

En esta sección se genera la matriz OD de viajes internos realizados únicamente en Pumabús. Un primer acercamiento a la matriz OD de los viajes en Pumabús se consigue con el uso de los datos que se obtuvieron en la encuesta mencionada en la sección 2.4., que da información acerca de las preferencias de los usuarios en cuanto a modos de transporte interno. A continuación, se presenta el procedimiento para obtener la primera aproximación de la matriz:

#### **1. Quitar el porcentaje de viajes que pueden hacerse a pie**

Según Molinero Molinero y Sánchez Arrellano (1997) el radio de distancia a una estación, en la cual ya no existe porcentaje de viajes que se realizan a pie, es de 1,150 metros; sin embargo, si se considera que los peatones ya han recorrido una distancia considerable entre las estaciones externas y las paradas origen, o para el caso de viajes generados entre las paradas destino y las estaciones externas, la distancia que se espera que estén dispuestos a recorrer a pie dentro de CU se reduce, más concretamente "la diferencia dispuestos a recorrer dentro de CU" es la diferencia entre 1150 metros y la distancia entre los orígenes o destinos asignados para un viaje y la estación externa (estación externa  $i$ , origen o destino  $j$ ).

$$dif = 1,150 - distancia\ en\ linea\ recta(estación\ i, origen\ interno\ j)$$

Para viajes internos cuya distancia más corta esté entre 0 y la diferencia dispuestos a recorrer ( $dif$ ), el viaje se elimina de la matriz origen- destino del sistema de transporte interno Pumabús, puesto que se espera que se efectúe a pie.

#### **2. Quitar el porcentaje de viajes que se pueden hacer en el modo de transporte interno: Bicipuma**

De la matriz origen-destino obtenida después de quitar los viajes que se pueden realizar a pie, es necesario también disminuir los viajes que se pueden realizar en Bicipuma, según la encuesta aplicada el porcentaje de los viajes que se realizan en Bicipuma es del 2.2%. Para disminuir los viajes en este porcentaje se identificaron

los viajes que se pueden realizar en Bicipuma, es decir donde existe un centro Bicipuma cercano (a un radio de 100 metros) tanto al origen como al destino del viaje, concretamente el origen y el destino del viaje debe ser alguna de las siguientes paradas: Medicina, Derecho Sur, Filosofía y Letras Sur, Arquitectura, Ingeniería Norte, Química, Camino Verde, Ciencias Políticas, Metro Universidad Oeste, Metrobús CU Oeste, MUCA, Ciencias por Circuito de la Investigación Norte, Ciencias por Circuito de la Investigación Sur, Instituto de Astronomía, Química Conjunto D y E. Para el caso de los viajes atraídos y generados en automóvil según la encuesta aplicada, no existen usuarios que opten por utilizar este medio de transporte en su viaje interno, hecho que se presenta en la realidad debido a que los usuarios tienden a estacionar el vehículo lo más cercano a su destino dentro de CU, y en caso contrario, al utilizar estacionamientos como los de los de la zona cultural o estacionamientos del Estadio Olímpico no tienen acceso a centros Bicipuma cercanos.

En las figuras 3.9 a la 3.12 se muestran las líneas de deseo de los viajes atraídos y generados por cada modo de transporte y que son posibles usuarios del Pumabús entre las 7 a 8 horas. Dado que no hay viajes generados por CU en los modos de transporte RTP, trolebús, Metrobús y de a pie entre las 7 a 8 horas, no existen líneas de deseo de viajes internos para ello. Sin embargo, existen 358 viajes generados en vehículo particular en este lapso de tiempo (tabla 3.15), pero no se evidencian las líneas de deseo de sus viajes internos, puesto que estos viajes presentan distancias inferiores a los 1,150 metros, dado que fueron viajes atraídos entre las 0 a 7 horas del día, por lo que logran ubicarse en estacionamientos inmediatamente aledaños a su destino dentro de CU.

En la figura 3.20 se presentan las líneas de deseo del total de viajes internos como resultado de los viajes atraídos y generados por CU. En la figura 3.21 se presentan las líneas de deseo de viajes internos por cada modo de transporte utilizado para llegar o salir de CU y en la figura 3.22 se presentan las líneas de deseo de viajes realizados por más de 50 personas.

De la figura 3.21 a 3.33 se muestran las líneas de deseo de viajes internos de CU como resultado de los viajes atraídos o generados por cada modo de transporte entre las 15 a 16 horas, sin embargo no se presentan las líneas de deseo de los viajes atraídos por CU en los modos de transporte Metrobús y a pie, puesto que no existen en la EOD2007 (probablemente sí existen viajes pero son muy pocos).

Existen 721 viajes atraídos en automóvil en este lapso de tiempo, pero no se presentan las líneas de deseo de sus viajes internos, puesto que las distancias de estos viajes internos son inferiores a 1150 metros, dado que en esta hora del día ya se ha liberado una cantidad importante de



estacionamientos cercanos a las diferentes facultades. En la figura 3.34 se presenta las líneas de deseo del total de viajes generados y atraídos entre las 15 a 16 horas y en la figura 3.35 se presenta las líneas de deseo del total de viajes realizados por más de 50 personas entre las 15 a 16 horas.

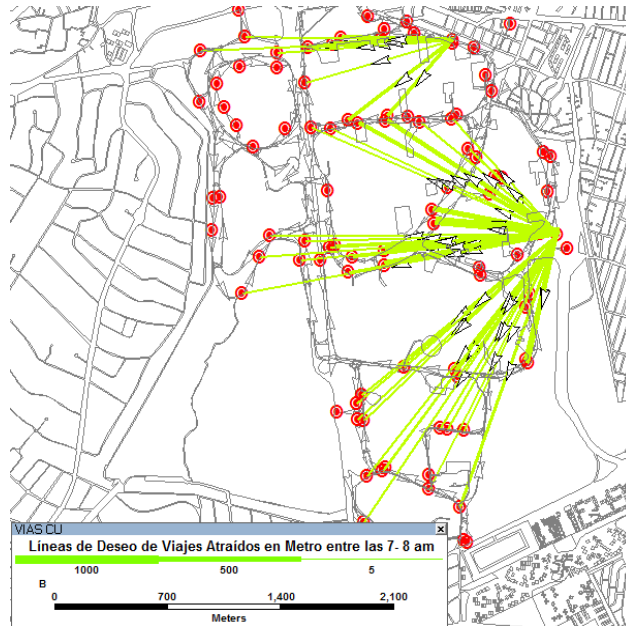


Figura 3.9 Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes atraídos a CU en Metro entre las 7 a 8 horas

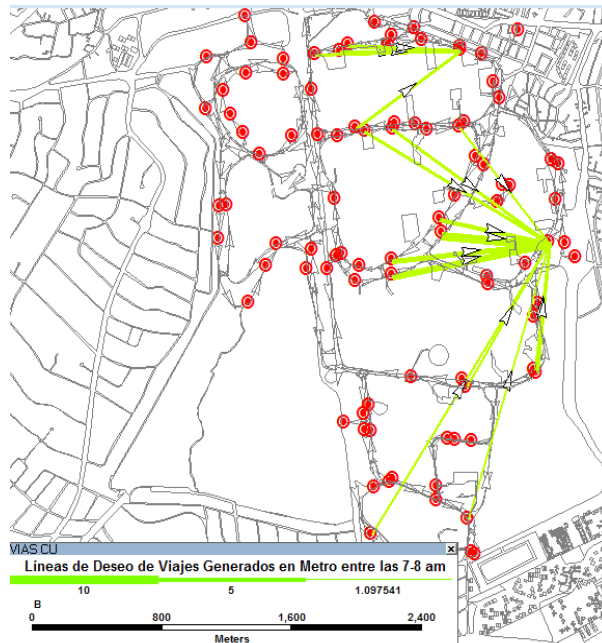


Figura 3.10 Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes generados por CU en Metro entre las 7 a 8 horas

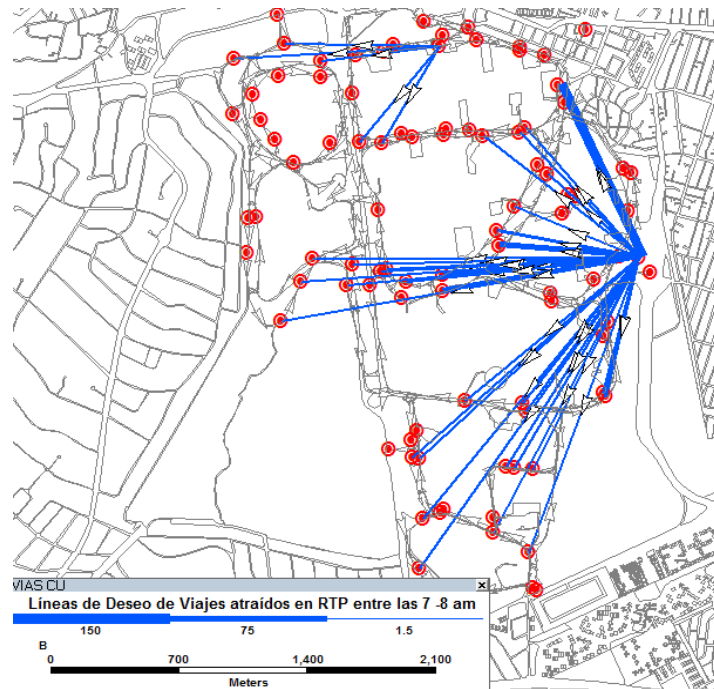


Figura 3.11 Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes atraídos a CU en RTP entre las 7 a 8 horas

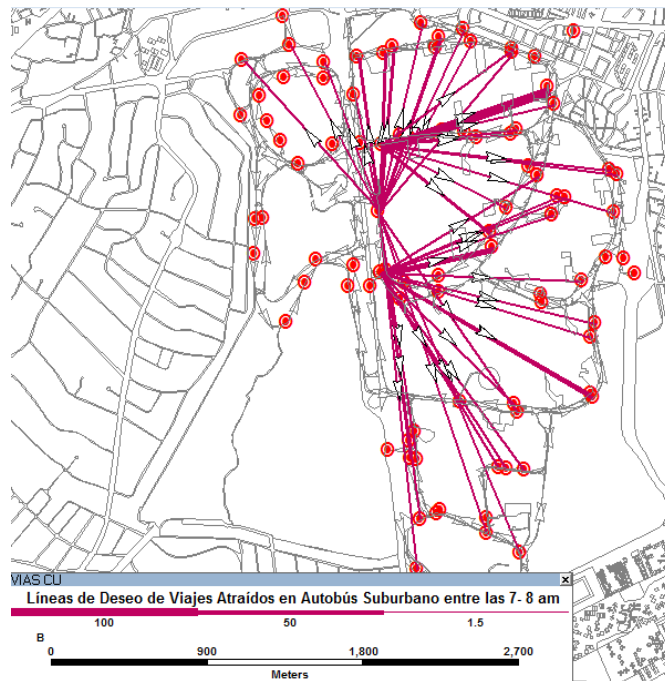
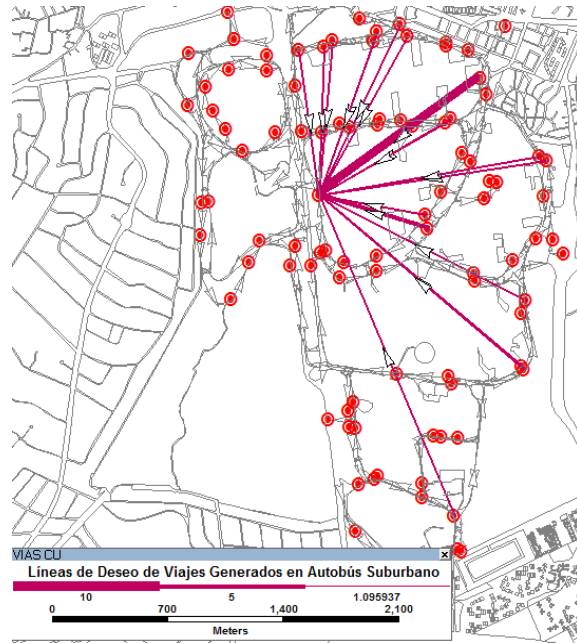
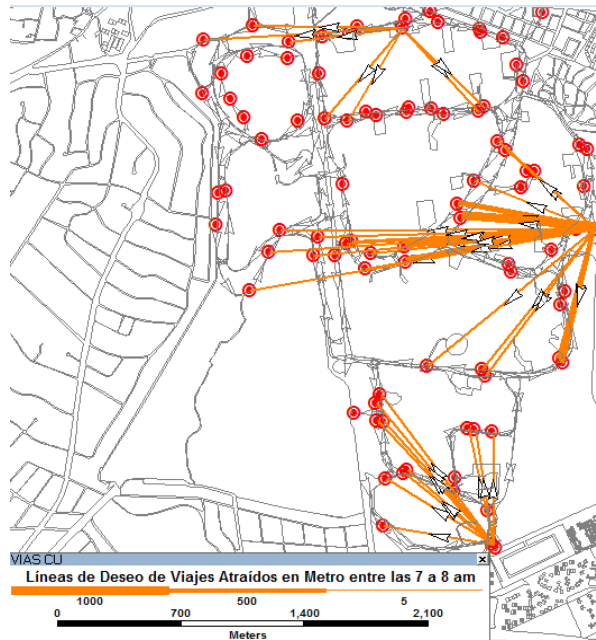


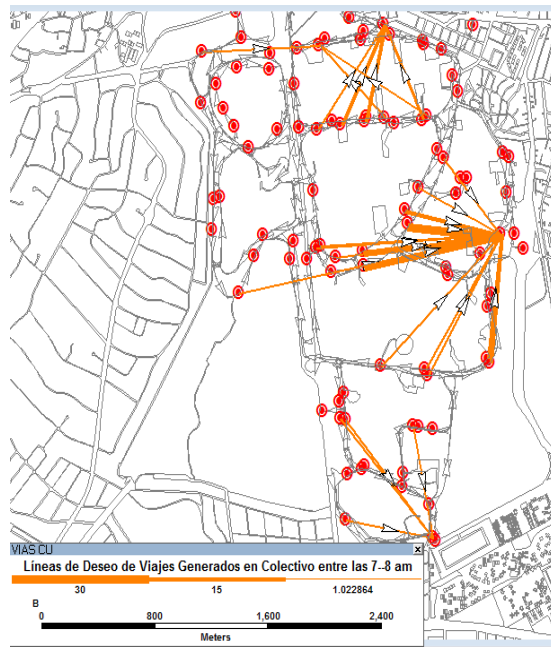
Figura 3.12 Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes atraídos a CU en autobús suburbano entre las 7 a 8 horas



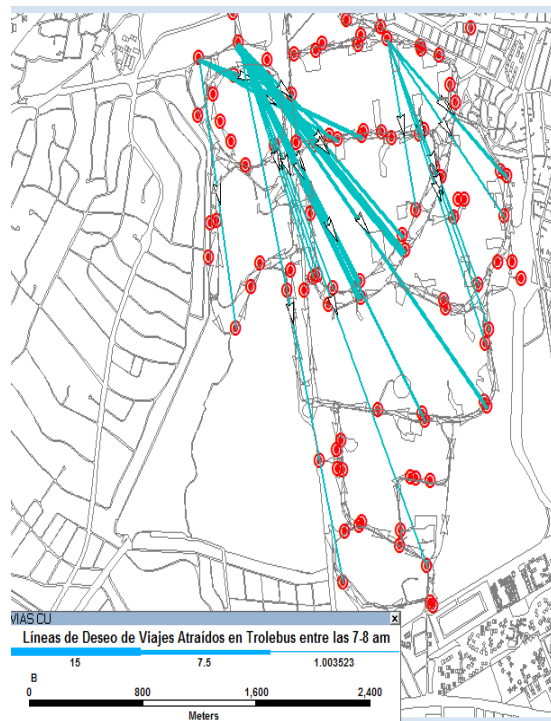
**Figura 3.13** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes generados por CU en autobús suburbano entre las 7 a 8 horas



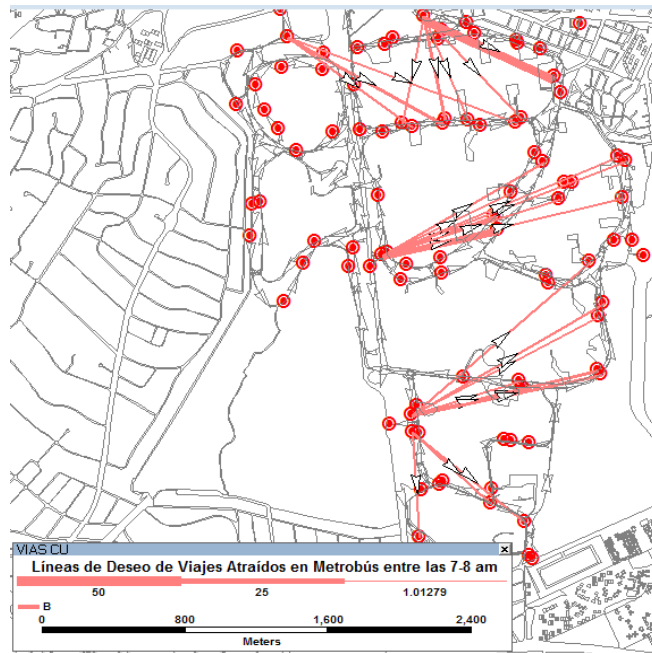
**Figura 3.14** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes atraídos a CU en colectivo entre las 7 a 8 horas



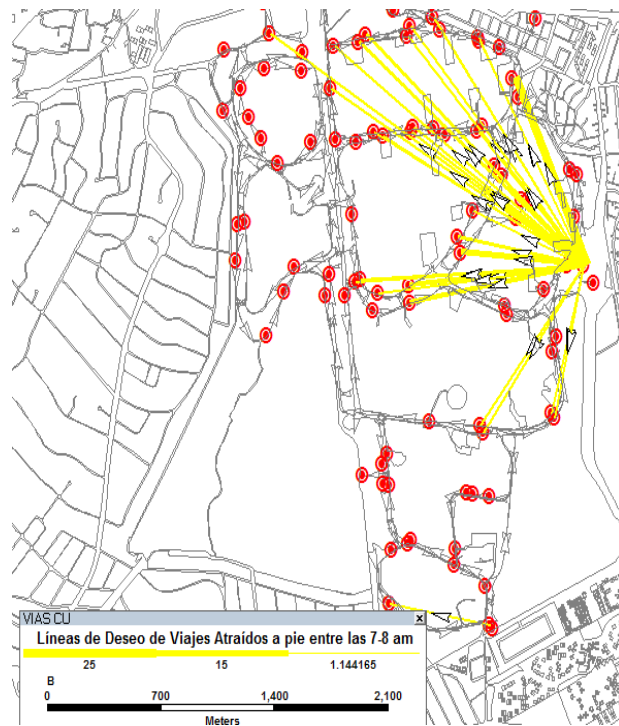
**Figura 3.15** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes generados por CU en colectivo entre las 7 a 8 horas



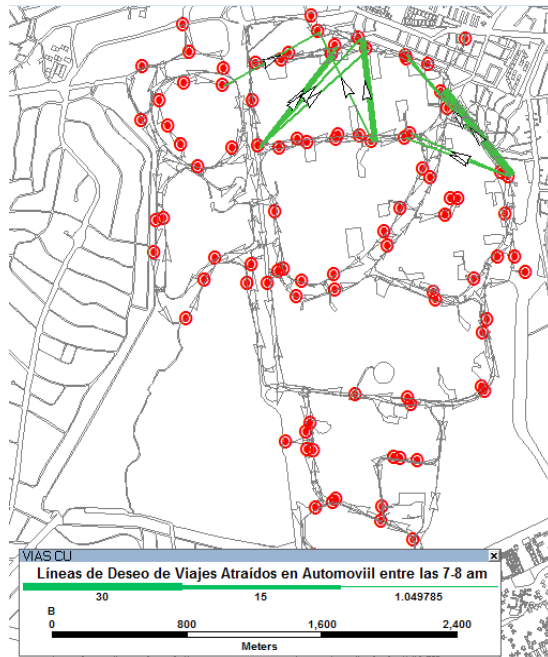
**Figura 3.16** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes atraídos a CU en trolebús entre las 7 a 8 horas



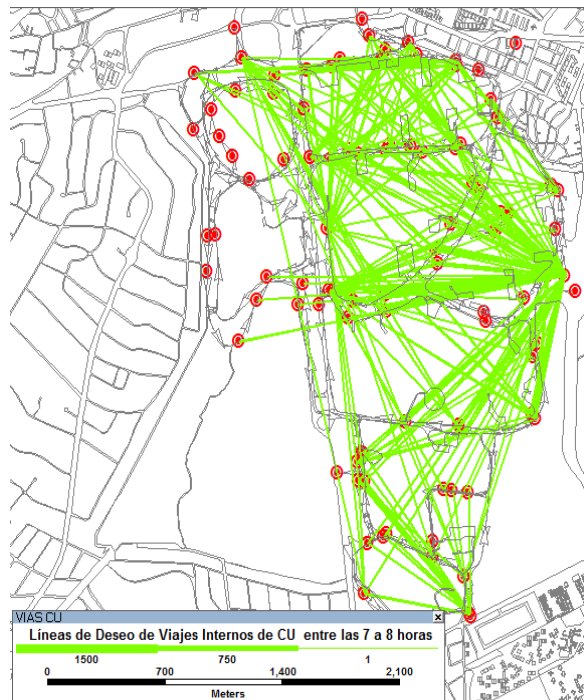
**Figura 3.17** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes atraídos a CU en Metrobús entre las 7 a 8 horas



**Figura 3.18** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes atraídos a CU a pie entre las 7 a 8 horas



**Figura 3.19** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes atraídos a CU en Automóvil entre las 7 a 8 horas



**Figura 3.20** Líneas de deseo de viajes internos de CU entre las 7 a 8 horas.



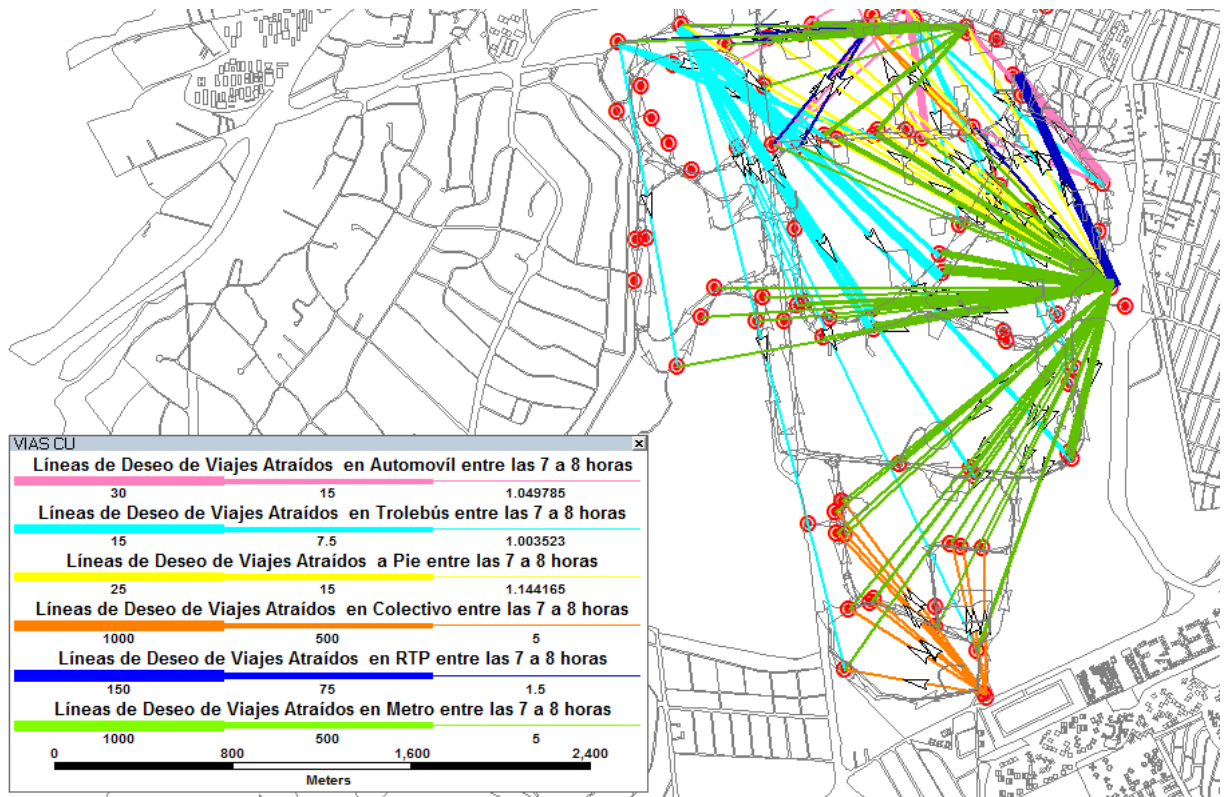


Figura 3.21 Líneas de Deseo de Viajes Internos de CU por modo de transporte entre las 7 a 8 horas

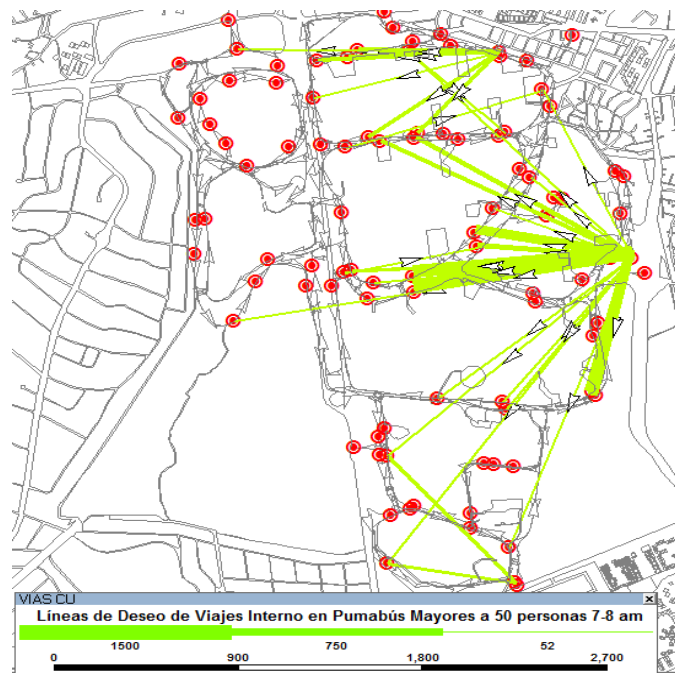
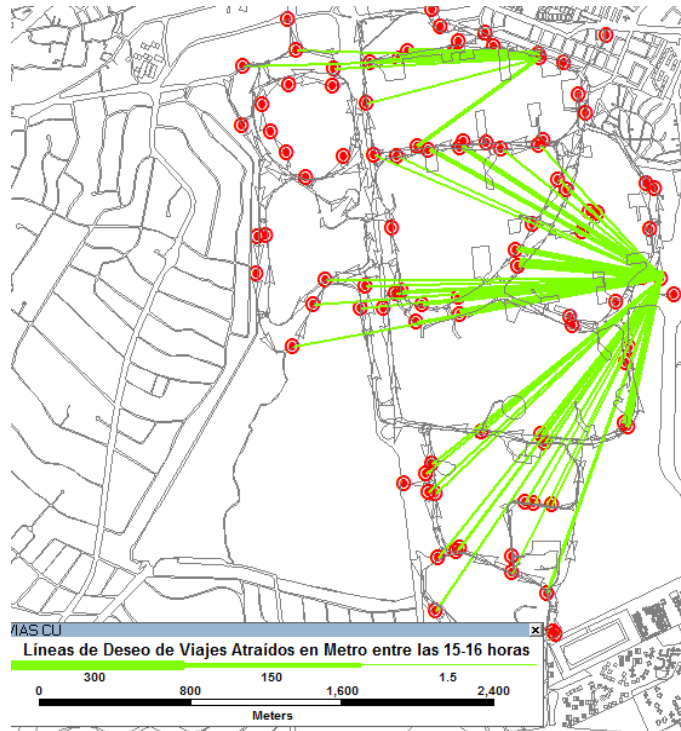
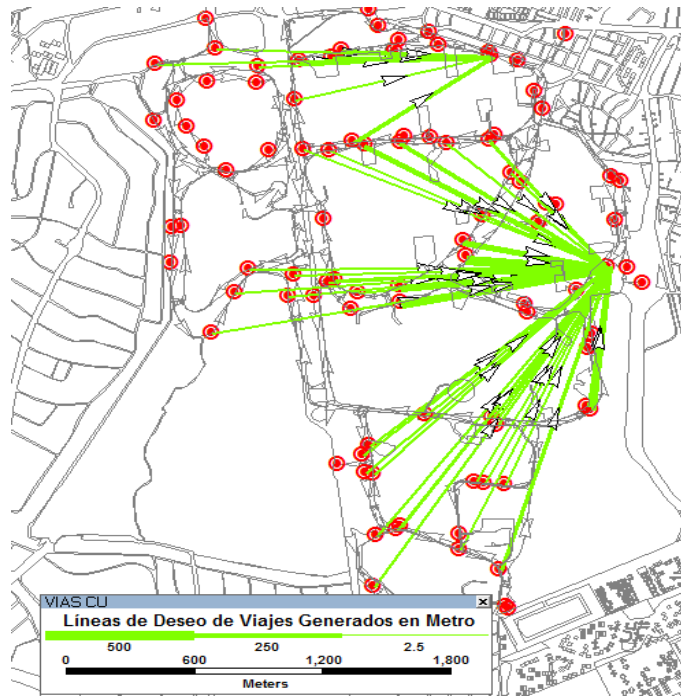


Figura 3.22 Líneas de deseo de viajes internos mayores a cincuenta personas entre las 7 a 8 horas

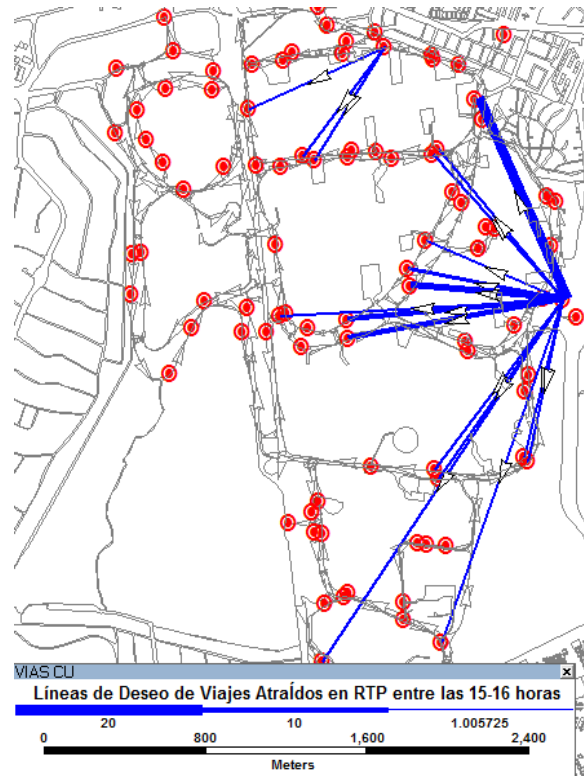




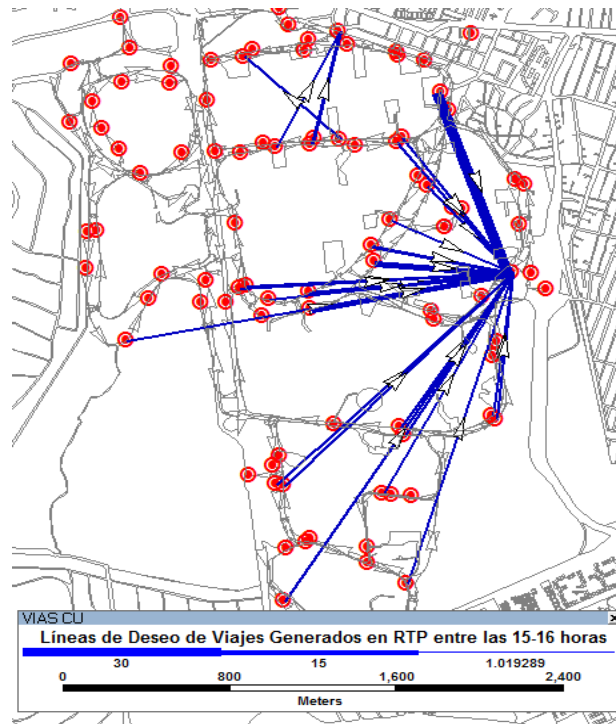
**Figura 3.21** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes atraídos por CU en Metro entre las 15-16 horas



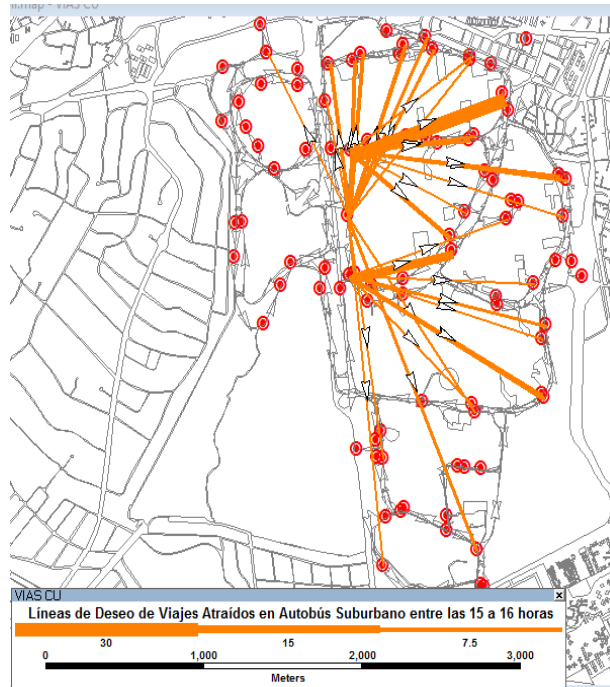
**Figura 3.22** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes generados por CU en Metro entre las 15-16 horas



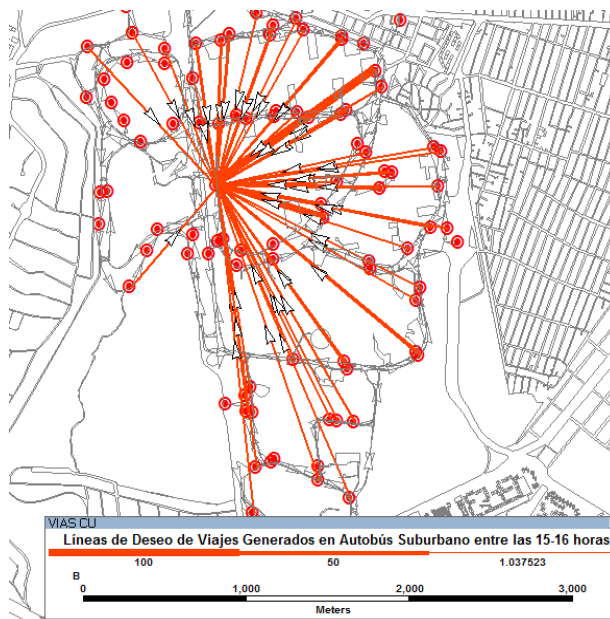
**Figura 3.23** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes atraídos por CU en RTP entre las 15-16 horas



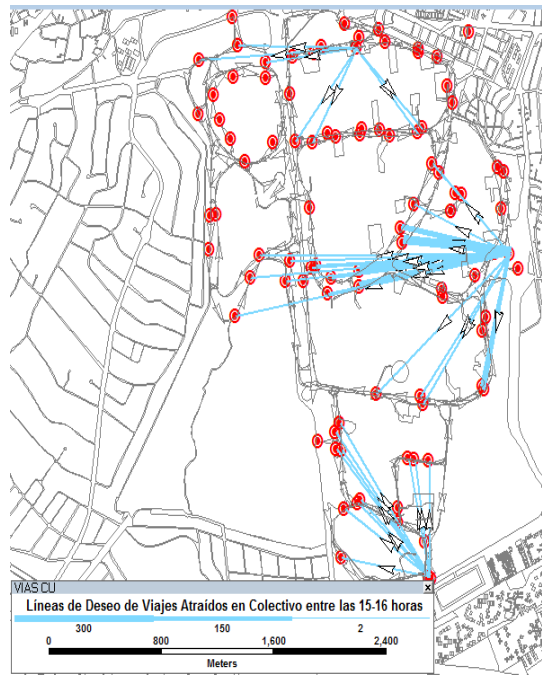
**Figura 3.24** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes generados por CU en RTP entre las 15-16 horas



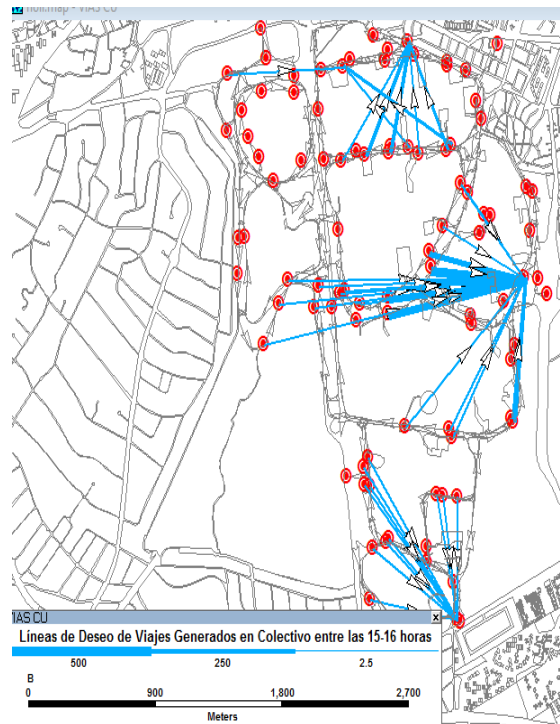
**Figura 3.25** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes atraídos por CU en autobús suburbano entre las 15-16 horas



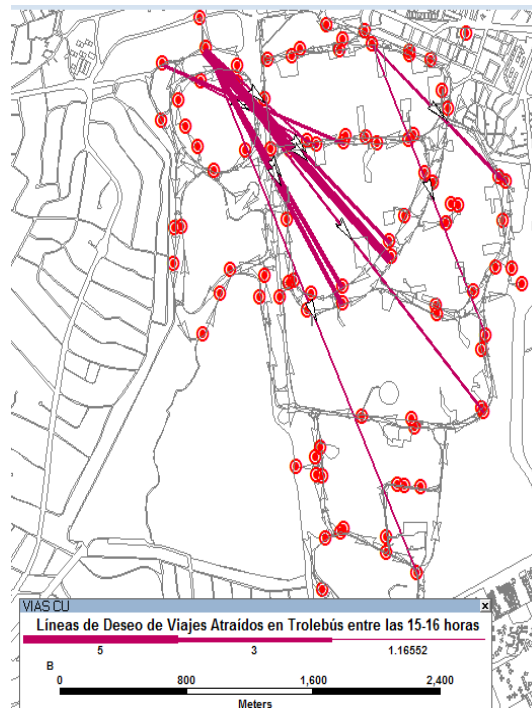
**Figura 3.26** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes generados por CU en autobús suburbano entre las 15-16 horas



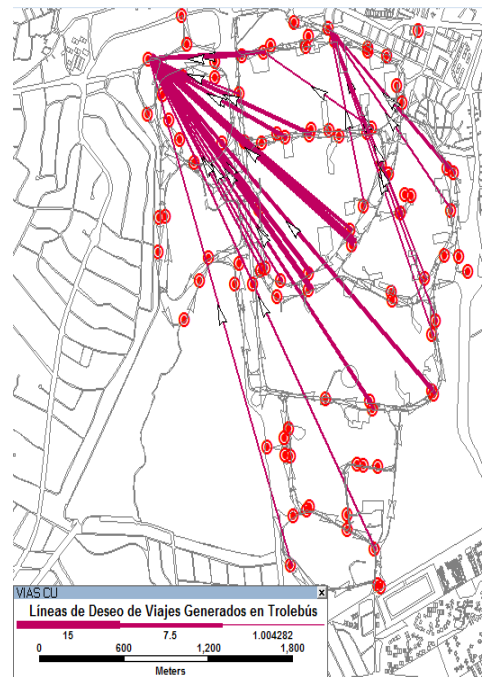
**Figura 3.27** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes atraídos por CU en colectivo entre las 15-16 horas



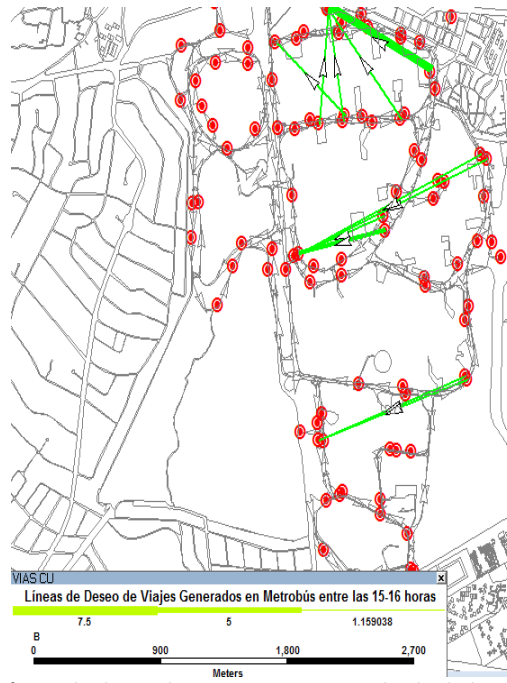
**Figura 3.28** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes generados por CU en colectivo entre las 15-16 horas



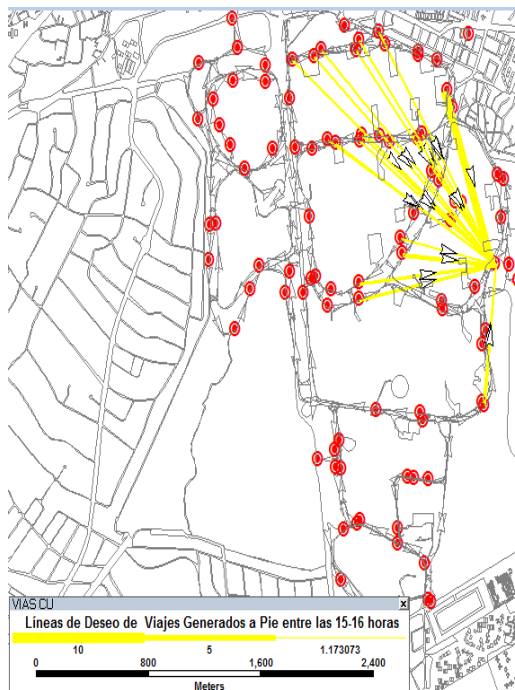
**Figura 3.29** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes atraídos por CU en trolebús entre las 15-16 horas



**Figura 3.30** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes generados por CU en trolebús entre las 15-16 horas

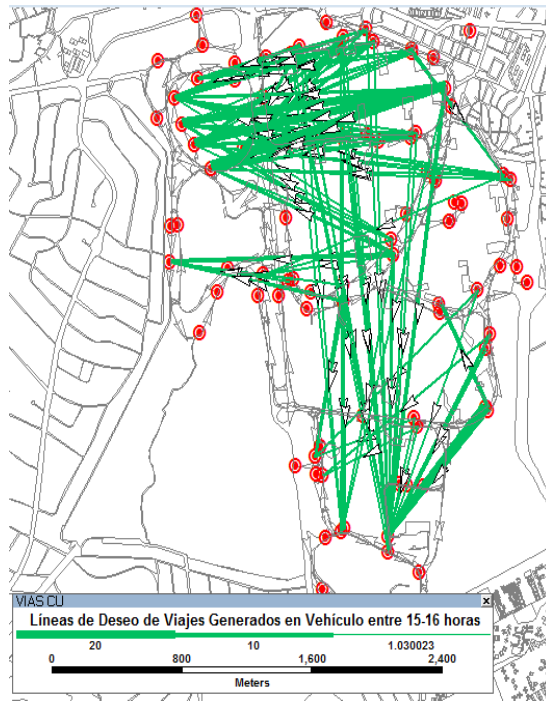


**Figura 3.31** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes generados por CU en Metrobús entre las 15-16 horas

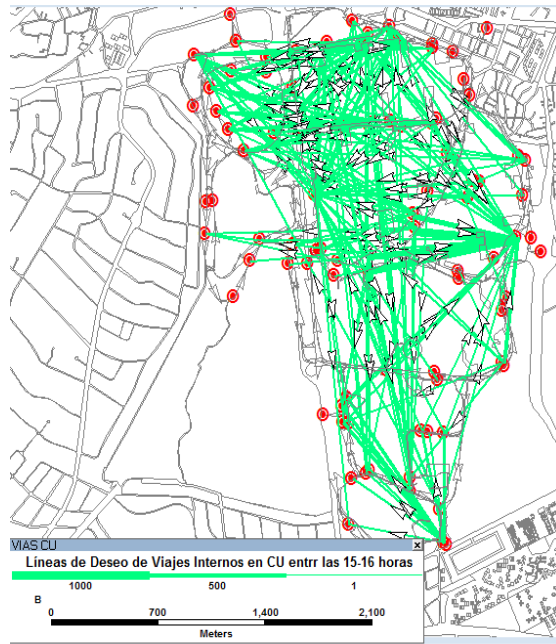


**Figura 3.32** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes generados por CU a pie entre las 15-16 horas





**Figura 3.33** Líneas de deseo de viajes internos resultado de los viajes generados por CU en automovil entre las 15-16 horas



**Figura 3.34** Líneas de deseo de viajes internos entre las 15-16 horas



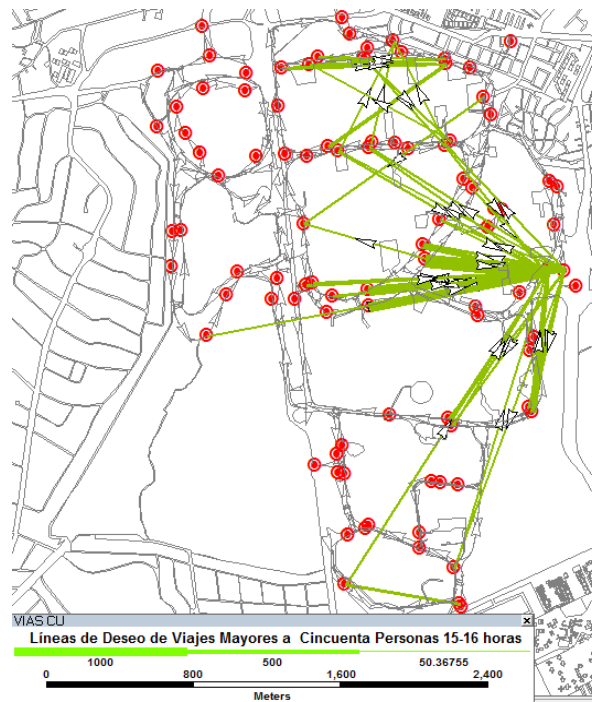


Figura 3.35 Líneas de deseo de viajes internos mayor a cincuenta personas entre las 15-16 horas .

### 3.6 Análisis de las líneas de deseo de viajes internos en CU

Contemplado lo afirmado por Molinero Molinero y Sánchez Arrellano (1997): *una red de rutas ideal es aquella que conecta los grandes generadores de viajes a través de rutas directas, cuya sinuosidad tienda a uno, con la máxima cobertura de demanda posible, además se debe lograr una ampliación en la cobertura cubriendo áreas de baja población, pero a menores frecuencias y con recorridos más largos. Sin embargo, es necesario que para al menos el 80 % de los viajes, la diferencia entre la distancia recorrida por un vehículo y la longitud de la ruta no se exceda en más de un 20%.*

De acuerdo a lo anterior y con base en los viajes atraídos y generados para cada uno de los modos de transporte, parecen ser necesarias tres rutas que partan de la estación Metro Universidad: una que recorra el circuito interior (ruta 1 actual), la segunda ruta que recorra el circuito exterior junto con el circuito deportivo sur, y otra que recorra la zona cultural de CU (ruta 3 actual). Con relación a la segunda ruta necesaria a diferencia de las rutas actuales como la ruta 2 y la ruta 4, éstas no abarcan la zona del circuito interior norte (desde centro médico hasta IIMAS). Las rutas 8 y 9 abarcan las zonas de interés, pero para abordar estas rutas es necesario realizar transferencias, puesto que estas rutas no llegan hasta la estación Metro Universidad y el realizar trasferencias el tiempo de viaje se incrementa por lo que no es una buena opción y además estas rutas realizan un recorrido más extenso que el de interés. El utilizar los autobuses de las cuatro rutas (2, 4, 8 y 9) para crear la segunda ruta necesaria, implica

cubrir una zona con gran afluencia de viajes y a una mayor frecuencia a la existente. Es claro entonces que este patrón de rutas no es útil para los viajes atraídos o generados en Trolebús, para ellos la ruta 1 y 11 actuales pueden funcionar correctamente, no obstante, es necesario evaluar qué frecuencia es la correcta para su funcionamiento, dado que el porcentaje de los viajes en este medio de transporte no es representativo. Con relación a los viajes atraídos y generados en autobús suburbano, es necesaria una ruta que comunique la parte poniente de circuito exterior sur (parada: Estadio de Prácticas) con la zona cultural de CU y otra con el circuito de investigación científica, las rutas 6 y 10 actuales realizan estos recorridos, pero abarcan más zonas que las necesarias. Las necesidades de transporte para viajes atraídos o generados en vehículos particulares parecen estar cubiertas con las rutas ya mencionadas.

### 3.7 Matriz origen-destino interna en Pumabús

El procedimiento descrito en la sección 3.5., arroja una matriz OD de 13,436 viajes internos para la primera hora pico (7:00 am a 8:00 am) y 12,911 viajes entre las 3:00 pm a 4:00 pm; sin embargo, el Pumabús cuenta generalmente con tan solo 33 y 28 vehículos para la primera y segunda horas de máxima demanda, respectivamente, esto en términos de capacidad mínima (si se considera que todos los viajes son directos y tienen la misma distancia de recorrido) es 2,889 y 2,357 usuarios. Tomando esta capacidad como una cota inferior del sistema, la matriz OD obtenida en el apartado 3.5. como un patrón de viajes a seguir y la distancia a recorrer en cada viaje, se obtiene la matriz OD de viajes que se puede atender con la flota actual del sistema para cada hora, mediante la siguiente ecuación:

$$x_{ij} = IC * \left( \mu * \left( \frac{OD_{ij}}{\sum_i \sum_j OD_{ij}} \right) + \beta * \left( \frac{D_{ij}}{\sum_i \sum_j D_{ij}} \right) \right) \quad (3.16)$$

$$\mu + \beta = 1 \quad (3.17)$$

Donde:

- IC: Cota inferior de capacidad
- $\mu$ : Peso de importancia del patrón de viajes dado por la demanda de viajes entre el origen i y el destino j
- OD<sub>ij</sub>: Número de viajes totales entre el origen i y el destino j
- $\beta$ : Peso de importancia de la distancia del viaje entre el origen i y el destino j
- D<sub>ij</sub>: distancia del viaje entre el origen i y el destino j

En la ecuación (3.16) se considera un grado de importancia tanto para las necesidades de viaje como para la distancia entre cada origen-destino, en este caso en particular se fijaron estos pesos en 0.8 y 0.2 respectivamente, dado que se considera que es necesario dar prioridad a los viajes que deben recorrer mayor distancia pero que a la vez su demanda sea lo suficientemente

representativa para darle cobertura. Este procedimiento arroja una matriz de 2,992 y 2,594 viajes para las horas de máxima demanda 1 y 2 respectivamente (ver figuras 3.35 y 3.36).

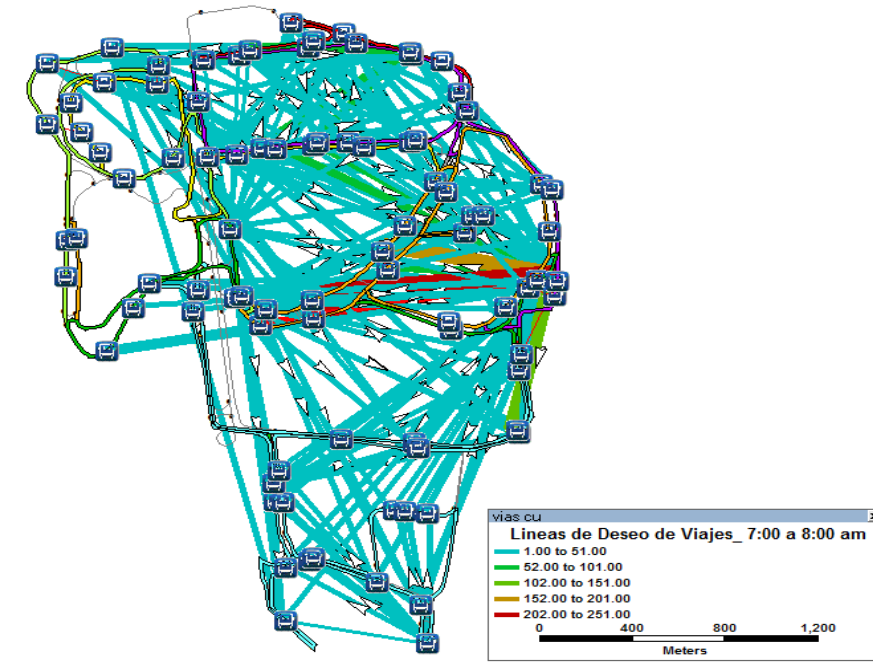


Figura 3.35 Líneas de deseo de viajes en Pumabús entre las 7-8 horas

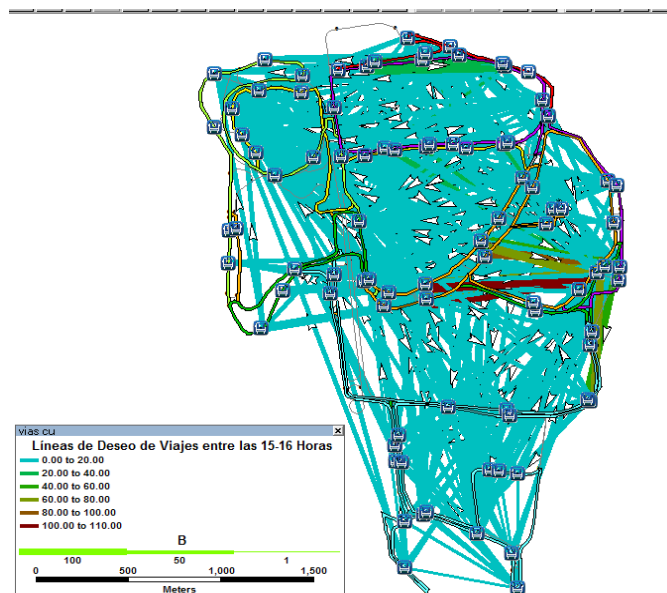


Figura 3.36 Líneas de deseo de viajes en Pumabús entre las 15-16 horas

## 4. ASIGNACIÓN DE TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS Y DIAGNÓSTICO DE LA RED

En este capítulo se da una breve introducción a los modelos de asignación de transporte público de pasajeros. Posteriormente se presentan algunos de los modelos más comunes disponibles en TransCAD, software seleccionado para llevar a cabo esta etapa dado que se dispone de él y del cual se tiene conocimientos previos. Se hace especial énfasis en los modelos de asignación estocásticos, por ser los más aproximados a la realidad. Por último, se presentan los resultados del modelo de asignación de transporte público estocástico de equilibrio del usuario para el sistema Pumabús y su respectivo análisis.

### 4.1 Introducción

Desde 1960 se introducen algoritmos heurísticos para resolver problemas de asignación de transporte público, muchos de ellos haciendo uso de criterios simples para el proceso de selección de ruta, como el método del Todo o Nada, este tipo de asignación encuentra el camino más corto bajo cualquier criterio como tiempo, distancia o costo de viaje (bajo supuestos de tiempo o costo fijos de viaje) y le asigna todo el flujo de pasajeros sin importar la capacidad, por el contrario al resto de rutas les asigna nada. Este tipo de modelos tienen como ventaja el bajo costo computacional y como desventaja, la no representatividad de la realidad; sin embargo, estos modelos se utilizan para la asignación de viajes en modos de transporte en los cuales no afecta la congestión, y también son utilizados para obtener una asignación semilla como base para realizar otro tipo de asignaciones más complejas(Liu, Bunker, y Ferreira, 2009).

Más tarde, se introducen los modelos de asignación de transporte público en equilibrio, estos modelos asumen que los usuarios perciben un tiempo de viaje fijo e igual en cada una de las rutas, por lo cual estos modelos son determinísticos en cuanto a percepción de ruta, además estos modelos consideran que el pasajero cuenta con información perfecta acerca de los itinerarios de las rutas. Wardrop (1979) (consultado en Liu et al., 2009) define el estado de equilibrio, como el estado en el cual ningún usuario reduce su tiempo de viaje solamente con el cambio de rutas, esto implica que todos los tiempo de viaje de todas la rutas utilizadas para un mismo par origen-destino deben ser iguales y menores o iguales al tiempo de viaje en las rutas no utilizadas. Las condiciones de equilibrio para el usuario según el primer principio de Wardrop se formulan mediante un problema de optimización (este modelo se presenta de la ecuación 4.1 a la 4.4), en este modelo el costo en cada arco depende exclusivamente de su flujo.

Sea:

$h_p$ : Flujo de pasajeros sobre la ruta p

$c_p(h)$ : Costo de viajes para los usuarios en la ruta  $p$  para un vector de flujo  $h$

$W$ : Conjunto de pares origen-destino

$w$ : Elemento de  $W$

$\bar{g}_w$ : Demanda de viajes del par OD  $w$

**Variables de decisión:**

$f_l$ : flujo en el arco  $l$

$$\delta_{lp} = \begin{cases} 1 & \text{si la ruta } p \text{ utiliza el arco } l \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

$$\text{minimizar } z = \sum_{l \in A} \int_0^{f_l} c_l(x) dx \quad (4.1)$$

*Sujeto a:*

$$\sum_{p \in P_w} h_p = \bar{g}_w, \forall w \in W, \quad (4.2)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{p \in P_w} \delta_{lp} h_p = f_l, \forall l \in A, \quad (4.3)$$

$$h_p \geq 0, \forall p \in P_w, w \in W. \quad (4.4)$$

La ecuación (4.2) busca satisfacer la demanda, la ecuación (4.3) es la relación entre los flujos en los arcos y los flujos en las rutas, y la ecuación (4.4) asegura que los flujos sean positivos. Estas tres ecuaciones aseguran la factibilidad de los flujos.

Existe un segundo principio de Waldrop, el cual es utilizado para diseñar la red de transporte: “los usuarios eligen la ruta que minimice el tiempo total empleado en transporte sobre la red”. Este principio es formulado como se presenta entre las ecuaciones 4.5 a 4.8 (Sheffi, 1985).

$$\text{minimizar } z = \sum_{l \in A} t_l(f_l) f_l \quad (4.5)$$

*Sujeto a:*

$$\sum_{p \in P_w} h_p = \bar{g}_w, \forall w \in W, \quad (4.6)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{p \in P_w} \delta_{lp} h_p = f_l, \forall l \in A, \quad (4.7)$$

$$h_p \geq 0, \forall p \in P_w, w \in W. \quad (4.8)$$

La función objetivo contiene una función de desempeño (volumen-retraso) no lineal creciente, que relaciona el tiempo o costo (generalmente costo generalizado) de un tramo de la red y el flujo que circula por éste. Existen varias funciones de desempeño, pero la más utilizada es la propuesta por la Agencia de Caminos Públicos de los Estados Unidos (ecuación 4.9), BPR por sus siglas en inglés (Bureau of Public Roads).

$$t_l(f_l) = t_0 \left[ 1 + \alpha \left( \frac{f_l}{k_l} \right)^\beta \right] \quad (4.9)$$

Donde  $t_l$  es el tiempo de viaje en el arco  $l$ ,  $f_l$  es el flujo sobre el arco  $l$ ,  $t_0$  es el tiempo de viaje a flujo libre (sin congestión) y  $k_l$  es la capacidad del arco  $l$ .  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros del modelo, usualmente  $\alpha = 0.15$  y  $\beta = 4.0$ .

Más reciente se han introducido modelos más cercanos a la realidad, como el modelo de asignación de transporte público de equilibrio estocástico (SUE), en el cual la selección de ruta busca disminuir el tiempo de viaje percibido por el usuario, además introduce un componente aleatorio (debido a que los usuarios no tienen información perfecta) y toma en cuenta la capacidad de las rutas (Liu et al., 2009). Lam, Gao, Chan, y Yang (1999) proponen un modelo de asignación basada en los modelos Logit Multinomial para redes de transporte público con congestión que se presenta en la sección 4.1.3.

En el modelo de asignación de transporte público propuesto por Yang y Lam (2006) el tiempo de viaje en vehículo, se ve claramente afectado por el nivel de congestión durante las horas pico, donde el recorrido de los autobuses y vehículos particulares es afectado por las condiciones de tráfico de la red. A la vez esto afecta los tiempos de espera y demora por sobre carga de pasajeros en las filas de las estaciones.

También existen modelos dinámicos, los cuales consideran la variación de la demanda o posibles cambios en las características de la red en el tiempo (Liu et al., 2009).

Lam y Xie (2002) determinan que las decisiones de los usuarios acerca del camino o ruta a tomar están determinadas por el grado de información que tengan sobre tiempos y modos de operación del sistema de transporte y además son influenciadas por el hecho de si hay traslape con otras rutas o no. Concluyen que los modelos de asignación de transporte público deben ser con base en una función objetivo multicriterio (tiempo, nivel de congestión, número de transferencias, tarifas, confort, entre otros) y no sólo con base en el tiempo mínimo de viaje.

Lam y Xie (2002) obtuvieron las conclusiones mencionadas mediante el planteamiento de tres modelos Logit de tamaño de ruta (descrito en el anexo 2) con base en datos de preferencia declarada, datos de preferencia obtenidos mediante el planteamiento de diferentes escenarios

a los usuarios, y uno que mezcla los dos tipos de datos. Los datos de preferencia declarada se obtuvieron mediante una encuesta realizada de forma aleatoria a 212 usuarios de transporte público en 1997, la cual recaba información sobre niveles socioeconómicos y de preferencia de viajes. El segundo tipo de datos de preferencia fueron obtenidos mediante 307 entrevistas aleatorias realizadas a usuarios de transporte público en 12 zonas aleatorias de Singapore en las cuales se tenía acceso a diferentes modos de transporte, en estas entrevistas se realizaba el planteamiento de un escenario de 44 escenarios propuestos para identificar los parámetros de selección de rutas entre un par de origen-destino dado, cada escenario consistía en tres alternativas hipotéticas representando combinaciones de servicio de transporte público, algunos de estos escenarios se plantearon con suficiente información en cuanto a tiempos de viaje y operación del sistema, mientras que otros sin información. Los modelos de selección de ruta desarrollados son importantes dado que proveen conocimiento para varias aplicaciones, tales como modelos de planeación de servicios de transporte, modelación de demanda de viajes e integración de modelos de selección de ruta con aplicaciones de sistemas de transporte inteligente.

A continuación, se describen algunos modelos de asignación de transporte público en redes gestionadas y se presenta el modelo formulado para el problema de líneas comunes, el cual se utiliza como parte de la rutina para solucionar modelos posteriores.

#### 4.1.1 El problema de línea común de autobuses (Bus Common Line Problem)

El problema de línea común de autobuses (Bus Common Line Problem), propone que para un par de nodos (origen-destino) para los cuales existe un conjunto de líneas en la que se puede realizar el recorrido (conjunto de líneas atractivas), el usuario puede optar por abordar el primer vehículo que llegue a su parada o esperar por el vehículo de otra línea que disminuya su tiempo de viaje (por ejemplo, un servicio expreso). El modelo es representado por las ecuaciones 4.1.1.1 y 4.1.1.2, en el cual el objetivo es disminuir el tiempo esperado de viaje, el cual está conformado por el tiempo de espera y por el tiempo de viaje en el vehículo de la línea  $l$  ( $t_l$ ). El tiempo de espera se asume como una variable aleatoria independiente con media  $\frac{\alpha}{f_l}$ ,  $l \in \overline{A_s}$  ( $\overline{A_s}$  es el conjunto de líneas atractivas para viajar de un nodo origen a un nodo destino),  $f_l$  es la frecuencia de la línea  $l$  y  $\alpha$  es un parámetro que se debe calibrar, comúnmente,  $\alpha=0.5$  si el tiempo de paso entre vehículos es constante y la distribución de llegada de pasajeros sigue una distribución uniforme y  $\alpha=1$ , si los tiempos de paso entre vehículos de cada línea se distribuyen exponencialmente y la distribución de llegada de pasajeros sigue una distribución uniforme. La solución de este problema, define el conjunto de líneas comunes o atractivas. (Lam et al., 1999).

$$\min_{\{x_l\}} \frac{\alpha + \sum_{l=1}^k t_l f_l x_l}{\sum_{l=1}^k f_l x_l} \quad (4.1.1.1)$$



Sujeto a:

$$x_l = \begin{cases} 1 & \text{si la línea } l \text{ pertenece a } \overline{A_s} \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (4.1.1.2)$$

#### 4.1.2 Modelo de asignación de transporte público de equilibrio del usuario (UE: User Equilibrium)

En esta sección se presenta el modelo de asignación de Equilibrio del Usuario propuesto por De Cea y Fernández (1993). En el modelo que proponen los autores se considera que los efectos de congestión repercuten en los tiempos de espera de los pasajeros en las paradas, para ello, introducen el concepto de frecuencia efectiva. Plantea que una proporción de vehículos que arriba a determinada parada no tiene capacidad disponible, impidiendo así el ingreso de nuevos usuarios, por lo cual éstos se ven obligados a esperar un segundo vehículo, la frecuencia determinada por este suceso la llaman frecuencia efectiva

Para el modelo la red se define como un conjunto de nodos y un conjunto de arcos que representan todas las secciones de ruta que existen en el sistema de transporte.

Una línea está definida como un grupo de vehículos que proveen el servicio de transporte público entre dos nodos de la red de vías urbana, este servicio está definido por su itinerario, frecuencia y capacidad de los vehículos, es decir, los vehículos de una misma línea tienen capacidad, características de operación e itinerarios iguales.

Una sección de línea es alguna porción de línea entre dos nodos de su itinerario, no necesariamente consecutivos.

Una ruta de transporte público está definida como algún camino que el usuario puede seguir en la red de transporte público para viajar entre algún par de nodos origen-destino, los nodos intermedios representan puntos de transferencia. La porción de ruta entre dos nodos de transferencia consecutivos es llamada "sección de ruta", la cual es asociada con un grupo de líneas atractivas.

Las líneas atractivas en una red de transporte congestionada son todas aquellas líneas que conectan un determinado par de nodos  $(i,j)$  origen-destino y que pueden ser abordadas en la parada  $i$ ; el grupo de líneas atractivas es determinado de acuerdo al grado de congestión de la red, si se considera que dos líneas conectan un par de nodos origen-destino determinado, una rápida y una lenta, cuando la red no está congestionada, sólo se considera la línea rápida como

línea atractiva, de lo contrario, si la red está congestionada, se consideran las dos líneas como líneas atractivas; esto debido a que el nivel de saturación de la línea más atractiva (la rápida) incrementa a medida que incrementa el flujo de pasajeros y por ende, el tiempo de espera de ésta, ante ello, los usuarios consideran también abordar la línea lenta.

Supuestos:

- La selección de ruta está basada en el mínimo tiempo de viaje (incluyendo los tiempos de espera).
- El tiempo de viaje se incrementa con el flujo de pasajeros, esto debido a que el sistema tiene una capacidad limitada.
- El fenómeno de congestión se presenta en las paradas. Los tiempos de espera dependen de la capacidad total del grupo de líneas atractivas consideradas y del número de pasajeros que usa ese grupo de líneas.
- Una vez que el pasajero aborda una línea, el tiempo de viaje es fijo y sólo está determinado por el grado de congestión de la red, el cual es un parámetro exógeno.
- El pasajero abordará en el primer vehículo que tenga un lugar disponible, el vehículo debe pertenecer a alguna de sus líneas atractivas.
- Los grupos de pasajeros esperando en una misma estación son diferentes, dado que cada uno tiene diferente grupo de líneas atractivas; por lo tanto, cada grupo de servicio es diferente en cuanto a capacidades, utilización y tiempos de espera.

El modelo de asignación de equilibrio del usuario propuesto por los autores se presenta en las ecuaciones 4.1.2.1 a 4.1.2.6.

Sea  $G = (N, L)$ , donde  $N$  es el grupo de nodos que representan las paradas y  $L$  el grupo de arcos, que incluyen las secciones de ruta, estas secciones de ruta abarcan las secciones de ruta y los arcos de espera, estos últimos representan el proceso de espera en las paradas. Por cada nodo habrá un arco de espera asociado a cada sección de ruta saliente del nodo.

- $W$ : El conjunto de pares origen-destino (OD)  
 $w$ : Un elemento del conjunto  $W$   
 $R$ : Conjunto de rutas disponibles en  $G$  para los usuarios  
 $R_w$ : Conjunto de rutas factibles asociadas con el par OD  $w$   
 $r$ : Un elemento del conjunto  $R$   
 $A_s$ : Conjunto de todas las líneas que van del nodo origen al nodo destino de la sección de ruta  $s$   
 $\delta_{sr}$ : Matriz de incidencia de secciones de ruta a rutas, donde

$$\delta_{sr} = \begin{cases} 1 & \text{si la sección de ruta } s \text{ pertenece a la ruta } r \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

- $i(s)$ : Nodo origen de la sección de ruta  $s$ .  
 $f_l$ : Frecuencia de la línea  $l$ .  
 $K_l$ : Capacidad de la línea  $l$ .  
 $f_s$ : Frecuencia total en la sección de ruta  $s$  ( $\sum_{l \in \bar{A}_s} f_l$ ).  
 $K_s$ : Capacidad en la sección de ruta  $s$  ( $\sum_{l \in \bar{A}_s} k_l$ ).  
 $T$ : Conjunto de demandas de los pares origen-destino(OD).  
 $T_w$ : Demanda entre el par OD  $w$ .  
 $\bar{A}_s$ : Conjunto de líneas atractivas asociadas a la sección de ruta  $s$ .  
 $V^s$ : Flujo de pasajeros en la sección de ruta  $s$ .  
 $h_r$ : Flujo de pasajeros sobre la ruta  $r$ .  
 $c_s$ : Costo de viaje para los usuarios en la sección de ruta  $s$ .  
 $\bar{t}_s$ : Costo de viaje en vehículo en la sección de ruta  $s$ .  
 $C_r$ : Costo de viaje para los usuarios, sobre la ruta  $r$  ( $C_r = \sum_{s \in l} \delta_{sr} c_s$ ).  
 $v_l^s$ : Pasajeros viajando en la línea  $l$ , sobre la sección de ruta  $s$  (flujo en la sección de línea).  
 $\bar{v}_{il}$ : Pasajeros que tomaron la línea  $l$  antes del nodo  $i(s)$ , y descenderán después del nodo  $i(s)$ .  
 $f'_s$ : Frecuencia efectiva total en la sección de ruta  $s$  ( $\sum_{l \in A_s} f'_l{}^s$ ).  
 $f'_l{}^s$ : Frecuencia efectiva de la línea  $l$  en la parada  $i(s)$ .  
 $\omega^s$ : Tiempo de espera asociado a la sección de ruta  $s$ .  
 $\bar{\omega}^s$ : Tiempo de espera asociado a la sección de ruta  $s$  (en estado de no congestión).  
 $\omega_l^i$ : Tiempo de espera de la línea  $l$  en el nodo  $i(s)$ .

$$\min_{V \in \Omega'} \int_0^V \hat{c}(x) \cdot dx \quad (4.1.2.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{r \in R_w} h_r = T_w, \forall w \in W \quad (4.1.2.2)$$

$$\sum_{r \in R} \delta_{sr} h_r = V^s, \forall s \in l \quad (4.1.2.3)$$

$$f'_s = \sum_{l \in \bar{A}_s} f'_l{}^s, \forall s \in S \quad (4.1.2.4)$$

$$v_l^s = f_l \cdot \bar{\omega}^s \cdot V^s \quad \forall l \in \bar{B}_s, s \in l' \quad (4.1.2.5)$$

$$V^s \geq 0, \forall s \in l \quad (4.1.2.6)$$

La ecuación (4.1.2.2) busca satisfacer la demanda de cada par de origen- destino, la ecuación (4.1.2.3) es la relación entre los flujos en los arcos y los flujos en las rutas, y la ecuación (4.1.2.6) asegura que los flujos sean positivos.

La ecuación (4.1.2.4) plantea que la frecuencia efectiva de una sección de ruta sea la suma de las frecuencias efectivas de las líneas pertenecientes al grupo de líneas atractivas  $\bar{A}_s$ .

Donde la frecuencia efectiva de la línea l en la parada y tiempo de espera de la línea l en el nodo i(s) están determinados por las ecuaciones (4.1.2.7) y (4.1.2.8) respectivamente.

$$f'_l{}^s = (\alpha_l / \omega_l^i) \quad (4.1.2.7)$$

$$\omega_l^i = \frac{\alpha_l}{f_l} + \varphi_l \left( \frac{\bar{v}_{il}}{k_l} \right) \quad (4.1.2.8)$$

Donde,  $\varphi_l$  es una función monótona creciente de  $\bar{v}_{il}$  (pasajeros que tomaron la línea l antes del nodo i(s), y descenderán después del nodo i(s)) definida por la ecuación 4.1.2.9.

$$\varphi_l = \beta_l \left( \frac{\bar{v}_{il}}{k_l} \right)^n = \beta_l \left( \frac{\bar{v}_{il}}{f_l k_l} \right)^n \quad (4.1.2.9)$$

$k_l$ : Capacidad del vehículo (número de lugares por vehículo).

$\omega_l^i$  es igual para todos los pasajeros que esperan en el nodo i(s), independiente de la sección de ruta que ellos usan. Si i(s) es la primera parada de la línea,  $\varphi_l = 0$ , porque  $\bar{v}_{il} = 0$  (pasajeros que tomaron la línea l antes del nodo i(s), y descenderán después del nodo i(s)) y la frecuencia efectiva es igual a la nominal, dado que, en la primera parada de la línea, los buses van vacíos. De igual forma Si no existe congestión en la red ( $\varphi_l = 0$ ), el valor de la frecuencia efectiva es igual a la frecuencia nominal. En otro caso, cuando la congestión se incrementa, el valor de  $\varphi_l$  se incrementa y, por lo tanto, la frecuencia efectiva decrece ( $f'_l{}^s \leq f_l$ ).  $\beta_l$  y n pueden ser calibrados usando un modelo de simulación de paradas de transporte público (De Cea y Fernández, 1993).

La ecuación (4.1.2.5) relaciona  $\bar{A}_s$  (grupo de líneas atractivas asociadas a la sección de ruta s) con el nivel de congestión de la sección de línea ( $v_l^s$ ). Surge a partir de la ecuación (4.1.2.10), donde el flujo en la sección de línea es asignado en proporción al número de lugares disponibles en los buses de la parada i(s):

$$v_l^s = x_l^s(v) \cdot f'_l{}^s(v) \cdot \omega^s(v) \cdot V^s \quad (4.1.2.10)$$

Considerando  $x_l^s$  como la variable que determina si la línea l se incluye en el grupo de líneas atractivas pertenecientes a la sección de ruta s ( $\bar{A}_s$ ).

$$x_l^s = \begin{cases} 1 & \text{si la sección } l \text{ pertenece a } \bar{A}_s, \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad \forall l \in A_s \quad (4.1.2.11)$$

$v$ : vector de flujo de la sección de línea  $s$

$\omega^s$ : tiempo de espera promedio por un pasajero usando la sección de ruta  $s$  (inversa de la frecuencia efectiva de la ruta  $f'_s$ ).

Sin embargo, dado que el grupo de líneas atractivas es determinado de acuerdo al nivel de congestión, se define la red  $G'=(N,l')$ , en la cual más de un arco puede ser creado entre un par de nodos dados. El primer arco asociado al grupo de líneas comunes se determina resolviendo el problema de líneas comunes con las frecuencias nominales de las líneas, este arco representa el grupo de líneas rápidas. Si hay todavía líneas sirviendo el mismo par OD, un segundo arco paralelo es creado resolviendo el nuevo problema de líneas comunes, considerando las líneas no incluidas en el primer arco. Este proceso continúa hasta que todas las líneas originales son asociadas a algún arco, cada arco  $s$ , es asociado a un grupo fijo de líneas atractivas. Sin embargo, el número de líneas atractivas para viajar entre un par OD dado es determinado de acuerdo al nivel de congestión, porque como se explicó anteriormente, cuando el flujo incrementa sobre la red, los arcos paralelos que contienen líneas lentas pueden ser usados para mantener las condiciones de equilibrio.

Dado que la red  $G'=(N,l')$ , es definida al inicio, la ecuación (4.1.2.10) puede ser sustituida por una ecuación no lineal (ecuación 4.1.2.12), en la cual  $f'_l$  y  $\omega^s$  dependan de  $v$  (volumen de pasajeros). Las variables  $x_l^s$  se eliminan del modelo, debido a que están determinadas a priori.

$$v_l^s = f'_l(v) \cdot \omega^s(v) \cdot V^s \quad \forall l \in \bar{B}_s, s \in l' \quad (4.1.2.12)$$

Donde  $\bar{B}_s$ : el grupo de líneas asociadas con cada arco en la nueva red  $G'=(N,l')$ , donde  $l \subseteq l'$ .

Sin embargo, esta ecuación no lineal incrementa la complejidad del problema, ante ello los autores proponen como uno de los métodos de solución, la linealización de esta ecuación, que conlleva a una solución aproximada del problema. Obteniéndose la ecuación 4.1.2.5 ( $v_l^s = f_l \cdot \bar{\omega}^s \cdot V^s \quad \forall l \in \bar{B}_s, s \in l'$ )

Así, los flujos de la sección de ruta son asignados a la sección de línea directamente proporcionales a la frecuencia nominal de la sección de ruta  $s$ . La congestión es solo considerada en las secciones de ruta, y depende del radio de flujo  $V^s$ ,  $\bar{V}_s$  y la capacidad total de la sección de ruta  $K_s$ . Dado que  $f_l$  y  $\bar{\omega}^s$  son constantes e independientes del nivel de congestión, determinados por la ecuación 4.1.2.13 y 4.1.2.14 respectivamente.

$$\bar{\omega}^s = \frac{1}{f_s} \quad (4.1.2.13)$$

$$f_s = \sum_{l \in \bar{B}_s} f_l \quad (4.1.2.14)$$

La función objetivo se obtiene a partir de la función de costos de la sección de ruta (funciones volumen-demora), ecuación 4.1.2.15.

$$c_s = \bar{t}_s + \frac{\alpha}{f_s} + \beta \cdot \varphi_s \left( \frac{V^s + \tilde{V}_s}{K_s} \right) \quad (4.1.2.15)$$

Donde:

$\bar{t}_s$ : Costos del viaje en vehículo, incluye el costo relacionado al tiempo de viaje en vehículo y la tarifa.

$f_s$ : Frecuencia total en la sección de ruta s.

El tercer término toma en cuenta explícitamente los efectos de congestión en los tiempos de espera y la función  $\varphi_s$ , es basada en la función potencia de las funciones BPR que hace que  $c_s$  sea estrictamente monótona en  $V^s$  (ecuación 4.1.2.16).

$$\varphi_s(V) = \left( \frac{V^s + \tilde{V}_s}{K_s} \right)^n \quad (4.1.2.16)$$

$V^s$  : El número total de pasajeros que abordan la misma sección de ruta en el nodo origen i(s)

$\tilde{V}_s$  : Flujo que compite con  $V^s$  por la misma capacidad, siendo  $\tilde{V}_s = v_{is}^+ + \bar{v}_{is}$ , donde  $v_{is}^+$ , representa el número total de pasajeros abordando, en el nodo origen i(s), otras secciones de ruta que usan la línea contenida en la sección de ruta s y  $\bar{v}_{is}$ , el número de pasajeros que abordaron todas las líneas pertenecientes a la sección de ruta s en nodos anteriores a i(s) y que desciende en un nodo diferente a i(s), así se presenta en la ecuación 4.1.2.17.

$$\tilde{V}_s = \sum_{l \in S} \sum_{r \in S_{is}^+} v_l^r + \sum_{r \in \bar{S}_{is}} v_l^r \quad (4.1.2.17)$$

$S_{is}^+$ : Grupo de secciones de ruta que salen del nodo i(s), excepto la sección de ruta s.

$\bar{S}_{is}$ : El grupo de secciones de ruta con nodo inicial ubicado antes de i(s) y con nodo final después de i(s).

El tiempo de espera se incrementa cuando  $\tilde{V}_s$  y/o  $V^s$  se aproximan a la capacidad  $K_s$ .  $\bar{v}_{is}$  reduce la capacidad de la sección de ruta s,  $v_{is}^+$  y  $V^s$  compiten por la capacidad resultante.

Como se mencionó anteriormente,  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros a calibrar;  $\alpha$  depende de las distribuciones de los tiempos entre llegada de vehículos (headway) y de los tiempos de llegada de pasajeros.  $\alpha$  toma el valor de 0.5, si la distribución de llegada de pasajeros es una distribución aleatoria uniforme y el intervalo de paso de los vehículos es constante (headway) y toma valor de 1 si el intervalo de paso de los vehículos (headway) se distribuye exponencialmente y se considera que la llegada de los pasajeros se distribuye uniforme.

Las ecuaciones (4.1.2.2), (4.1.2.3), (4.1.2.6) y (4.1.2.12) definen el grupo de flujos factibles ( $\Omega$ ). Un grupo de flujos factibles es equilibrado si satisface las siguientes condiciones Wardropianas sobre la red  $G'(N, I')$  (ecuación 4.1.2.18).

$$C_r \begin{cases} = u_w, \forall r \in R_w/h_r \geq 0; \\ > u_w, \forall r \in R_w/h_r = 0; \end{cases} \quad \forall w \in W \quad (4.1.2.18)$$

Donde,  $u_w$  es el costo de viaje de equilibrio sobre todas las rutas que conectan  $w$ .

Un equilibrio puede ser representado por el problema variacional presentado en la ecuación 4.1.2.19 (problema de asignación):

$$c(V^*). (V^* - V) \leq 0, \forall V \in \Omega \quad (4.1.2.19)$$

Donde  $c$  es el vector de costos de las secciones de ruta,  $V$  es algún vector factible de flujo de la sección de ruta  $\{V^s\}$ , y  $V^*$  es la solución de equilibrio.

Linealizando la ecuación 4.1.2.12, el grupo factible original  $\Omega$  puede ser remplazado por un nuevo grupo  $\Omega'$  (ecuación 4.1.2.20) .

$$c(V^*). (V^* - V) \leq 0, \forall V \in \Omega' \quad (4.1.2.20)$$

Dado que el vector de función de costos ( $c(V)$ ), tendrá un Jacobiano asimétrico, este problema no tiene una formulación de optimización equivalente. Los autores proponen resolver el problema de asignación en una red asimétrica mediante el método de diagonalización, el cual es matemáticamente representado como un problema de desigualdades variacionales (ecuación 4.1.2.21)

$$\hat{c}(V^*). (V^* - V) \leq 0, \forall V \in \Omega' \quad (4.1.2.21)$$

El cual tiene un problema de optimización de costos convexo de la forma (ecuación 4.1.2.1):

$$\min_{V \in \Omega'} \int_0^V \hat{c}(x). dx$$

Este problema se resuelve hasta que se obtenga una solución en equilibrio. El método de solución más común según los autores es el método de descenso Frank -Wolfe (anexo 3).

### 4.1.3 Modelo de asignación de transporte público estocástico de equilibrio del usuario (SUE: The Stochastic User Equilibrium Model)

El modelo de asignación estocástico de equilibrio del usuario parte del supuesto de que la percepción idéntica y perfecta por parte de los usuarios es irreal cuando se trata de redes de transporte congestionadas, en las cuales el usuario no tiene información perfecta sobre las



características de los viajes. Así se extiende el principio de equilibrio del usuario a: “el equilibrio es obtenido cuando ningún costo percibido por el viajero puede ser reducido solamente por cambiar de ruta”(Daganzo y Sheffi, 1977) consultado en Liu, Bunker y Ferreira (2009).

En esta sección se presenta el modelo SUE para redes de transporte público congestionadas propuesto por Lam et al. (1999), el cual busca predecir simultáneamente cómo los pasajeros seleccionan sus rutas óptimas y estiman el costo total del viaje. Este modelo toma en cuenta la capacidad de las rutas, a diferencia de otros modelos como el modelo de asignación todo o nada, el cual tienen dos características irreales: la asignación de viajes a rutas que ya han sobrepasado su capacidad y la subutilización de otras rutas que abarcan el mismo origen-destino que las primeras. Este modelo SUE asume que la demanda origen-destino (OD) es fija y que sólo un grupo de vías alcanzan su capacidad pero la red tiene capacidad suficiente para acomodar el total de la demanda OD. Se plantea que el tiempo de viaje percibido es diferente para cada pasajero, así el tiempo de viaje de cada ruta es tratado como una variable aleatoria. Además, los autores del citado modelo realizaron los siguientes supuestos para formular un modelo matemático que estime el tiempo de espera y la demora por sobrecarga de pasajeros:

1. Cuando los pasajeros están esperando en alguna estación, ellos consideran un grupo determinado de líneas atractivas y abordan el primer vehículo que llegue de éstas.
2. Los pasajeros quienes no fueron servidos por el primer vehículo que arribó a la estación, serán servidos por el siguiente vehículo o se transfieren a rutas alternativas.

Considerando  $G=(N,L)$  como un grafo con un conjunto de  $N$  nodos, que representa las paradas de autobús y  $L$  representa el grupo de arcos de la red. Como arco se considera las secciones de línea y los arcos de espera (utilizados para modelar los tiempos de espera).

En el modelo citado se considera que una línea está caracterizada por una frecuencia y un tipo de vehículo.

Una sección de línea es alguna porción de línea entre dos nodos consecutivos de su itinerario, caracterizada por una frecuencia y un tipo de vehículo.

Una ruta de transporte público está definida como algún camino que el usuario puede seguir en la red de transporte público para viajar entre algún par de nodos origen-destino, los nodos intermedios representan puntos de transferencia. La porción de ruta entre dos nodos de transferencia consecutivos es llamada “sección de ruta”, la cual es asociada con un grupo de líneas atractivas.

- $\bar{A}$ : Conjunto atractivo de líneas de transporte público en la red  $G$
- $W$ : Conjunto de pares origen-destino(OD)
- $w$ : Un elemento del grupo  $W$

- $R_w$ : Conjunto de rutas factibles asociadas con el par OD w  
 $f_s$ : Frecuencia del arco s  
 $K_s$ : Capacidad del arco s  
 $C_s$ : Costo de viajes del arco s  
 $A_i^+$ : Conjunto de arcos saliente del nodo i  
 $A_i^-$ : Conjunto de arcos entrante al nodo i  
 $g_w$ : Demanda entre el par OD w  
 $t_s$ : Tiempo de viaje en vehículo en el arco s  
 $u_s$ : Tiempo de espera del arco s  
 $d_s$ : Tiempo de penalización que los pasajeros tienen que esperar por el próximo arribo de un vehículo (cuando no pueden abordar el primer vehículo por capacidad insuficiente en el arco s) o transferencia entre rutas.  
 $\bar{A}_i^+$ : Conjunto de todas las líneas atractivas por cada destino asociado con el nodo i, el cual es igual a  $A_i^+ \cap \bar{A}$   
 $v_s$ : Flujo de pasajeros en el arco s  
 $h_r^w$ : Flujo de pasajeros en la ruta  $r \in R_w$   
 $V$ : Vector del flujo de arco  
 $G$ : Vector de demanda OD  
 $H$ : Vector de flujo de ruta o de camino  
 $K$ : Vector de capacidad del arco s  
 $l_w$ : Multiplicador de Lagrange entre el par OD w  
 $t_r^w$ : Tiempo de viaje en vehículo entre el par OD w en la ruta r  
 $u_r^w$ : Tiempo de espera entre el par origen-destino w en la ruta r  
 $m_r^w$ : Suma de los multiplicadores de Lagrange  $m_s$  a lo largo de la ruta r  
 $m_s$ : Multiplicador de Lagrange del arco s ( $m_s = -\theta d_s$   $s \in \bar{A}$ )  
 $\theta$ : Parámetro que mide el grado de conocimiento sobre el costo de viaje de la ruta  
 $W(\bar{A}_i^+)$ : Tiempo esperado de espera por la llegada del primer vehículo que sirva alguno de los arcos  $\in A_i^+$   
 $T_r^w$ : Tiempo de viaje en vehículo percibido por el pasajero de la ruta  $r \in R_w$   
 $U_r^w$ : Tiempo de espera percibido por el pasajero en la ruta  $r \in R_w$   
 $d_r^w$ : Demora por sobrecarga de pasajeros en la ruta  $r \in R_w$   
 $t_r^w$ : Tiempo de viaje en vehículo del pasajero en la ruta  $r \in R_w$   
 $u_r^w$ : Tiempo de espera del pasajero en la ruta  $r \in R_w$   
 $C_r^w$ : Tiempo total de viaje percibido por el pasajero en la ruta  $r \in R_w$  (variable aleatoria)  
 $c_r^w$ : Tiempo total de viaje del pasajero en la ruta  $r \in R_w$

La formulación del modelo propuesto por Lam et al. (1999) se presenta de la ecuación 4.1.3.1 a la ecuación 4.1.3.5

$$\text{Min } \theta \sum_{s \in \bar{A}} (t_s + u_s) v_s + \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} h_r^w (\ln h_r^w - 1) \quad (4.1.3.1)$$

Sujeto a:

$$g=Bh, \quad (4.1.3.2)$$

$$v=Ah, \quad (4.1.3.3)$$

$$v \leq k, \quad (4.1.3.4)$$

$$h \geq 0, \quad (4.1.3.5)$$

Para este modelo la función de Lagrange es formulada en la ecuación 4.1.3.6

$$L' = \theta \sum_{s \in \bar{A}} (t_s + u_s) v_s + \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} h_r^w (\ln h_r^w - 1) + l^T (g - Bh) + m^T (k - v) \quad (4.1.3.6)$$

Cuando las restricciones de capacidad son alcanzadas, los Multiplicadores de Lagrange dan equilibrio a las demoras que se presentan por sobrecarga de pasajeros. El tiempo de demora por sobrecarga de pasajeros se incrementa proporcionalmente a  $\theta$ .

El modelo Logit para la selección de ruta determinado por este modelo está dado por la ecuación (4.1.3.7). Este modelo Logit es compatible con la asignación de transporte público SUE con congestión si y solo si  $m_r^w = -\theta d_r^w$ .  $m_r^w$  asegura que la capacidad de la ruta r no sea excedida. Si  $\theta$  es muy grande, entonces el segundo término de la función objetivo es insignificante y el problema se aproxima al modelo de asignación UE.

$$h_r^w = \frac{\exp(-\theta(t_r^w + u_r^w) + m_r^w)}{\sum_{k \in R_w} \exp(-\theta(t_r^w + u_r^w) + m_k^w)} g_w, r \in R, w \in W \quad (4.1.3.7)$$

En la ecuación (4.1.3.2), B es la matriz de elementos  $b_{wr}$ , que son iguales a 1, si la ruta r conecta el par OD w y cero en cualquier otro caso. Donde la relación entre el flujo OD y el flujo de pasajeros en las vías está determinada por la ecuación (4.1.3.8). Por lo que el conjunto de restricciones de este tipo se puede escribir así:  $g=Bh$

$$\sum_{r \in R_w} h_r^w = g_w, w \in W \quad (4.1.3.8)$$

En la ecuación (4.1.3.3), A es la matriz de elementos  $a_{sr}$ , los cuales son iguales a 1 si el arco s pertenece a la ruta r y 0 en cualquier otro caso. Donde la relación entre el flujo de los arcos y el flujo de las rutas está determinada por la ecuación (4.1.3.9). Por lo que el conjunto de restricciones de este tipo se puede escribir así:  $v=Ah$ .

$$v_s = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} a_{sr} h_r^w \quad (4.1.3.9)$$

La ecuación (4.1.3.4) representa el conjunto de restricciones de capacidad de la forma de la ecuación (4.1.3.10).

$$v_s \leq k_s \quad (4.1.3.10)$$

Los costos de cada arco, se conforman por tres componentes: Tiempo de viaje  $t_s$ , tiempo de espera  $u_s$  y demora por sobre carga de pasajeros  $d_s$  (ecuación 4.1.3.11).

$$C_s = t_s + u_s + d_s \quad (4.1.3.11)$$

Donde

$t_s = 0$ , si el arco  $s$  es un arco de espera,

$t_s = t_s$ , si el arco  $s$  es una sección de línea.

$u_s = 0$ , si el arco  $s$  es una sección de línea,

$u_s = W(\bar{A}_i^+)$ , si el arco  $s$  es un arco de espera  $\forall s \in \bar{A}_i^+, i \in N$

$d_s = d_s$ , si el arco  $s$  es una sección de línea,

$d_s = 0$ , si el arco  $s$  es un arco de espera  $\forall s \in \bar{A}_i^+, i \in N$ .

$W(\bar{A}_i^+)$  es la función que determina el tiempo de espera esperado para la llegada del primer vehículo que sirve alguno de los arcos  $s \in \bar{A}_i^+$  (ecuación 4.1.3.12), en la cual se considera que la distribución del tiempo de espera de cada arco  $s$  es cuantificado por un parámetro positivo  $f_s$ , definido como la frecuencia del arco  $s$ . Como se mencionó en modelos anteriores,  $\alpha$  es parámetro de calibración y depende de la distribución que siguen los datos del intervalo de paso de los vehículos (headway).

$$W(\bar{A}_i^+) = \frac{\alpha}{\sum_{s \in \bar{A}_i^+} f_s} \quad (4.1.3.12)$$

La demora por sobrecarga de pasajeros es determinada por las condiciones de equilibrio de la congestión en la red de transporte, más concretamente mediante la solución de un sistema de ecuaciones que incluye: las ecuaciones del tiempo de viaje en el arco  $s$  que dependen del volumen de viajes (ecuación 4.1.3.13, en la cual  $t_s^0$  es el costo de viajes del arco  $s$  a flujo libre), la ecuación de igualdad de tiempos de viaje en líneas atractivas, la ecuación de conservación del flujo y la ecuación de satisfacción de la demanda (para más detalles acerca de la obtención de los flujos y tiempos de demoras para arcos remitirse al ejemplo 1 de Lam et al., (1999)). Se define  $d_s$  como la demora por sobrecarga de pasajeros en el vehículo del arco  $s$  conectando a la estación  $i$ , ésta se puede incrementar si  $v_s > k_s$  y es igual a cero si  $v_s \leq k_s$  ( $s \in \bar{A}_i^+, i \in N$ ),

es decir puede haber demora por sobrecarga de pasajeros cuando algunos pasajeros no pueden abordar el primer vehículo que arribe (ecuación 4.1.3.14).

$$t_s(v_s) = t_s^0 [1 + v_s/k_s] \quad (4.1.3.13)$$

$$d_s \begin{cases} = 0, & \text{si } v_s < k_s \\ \geq 0, & \text{si } v_s = k_s \end{cases} \quad (4.1.3.14)$$

Sin embargo, en una red de transporte congestionada, hay variaciones en la percepción de cada pasajero en cuanto a tiempos de viaje y espera (variables aleatorias) y otros factores estocásticos como el tiempo y los incidentes (esto hace que la asignación SUE sea más realista), así: el tiempo de viaje en vehículo percibido por el pasajero de la ruta  $r \in R_w$  y el tiempo de espera percibido por el pasajero en la ruta  $r \in R_w$  están determinados por las ecuaciones (4.1.3.15) y (4.1.3.16) respectivamente.

$$T_r^w = t_r^w + \tau_r^w, r \in R_w, w \in W \quad (4.1.3.15)$$

$$U_r^w = u_r^w + \eta_r^w, r \in R_w, w \in W \quad (4.1.3.16)$$

Donde  $\tau_r^w$  y  $\eta_r^w$  son los términos aleatorios de error que dependen de la distribución del intervalo de paso de los vehículos y del patrón de arribo de los pasajeros respectivamente. Así, el tiempo total de viaje del pasajero en la ruta  $r \in R_w$  y el tiempo total de viaje percibido por el pasajero en la ruta  $r \in R_w$  están determinados por las ecuaciones (4.1.3.17) y (4.1.3.18) respectivamente.

$$c_r^w = t_r^w + u_r^w + d_r^w \quad (4.1.3.17)$$

$$C_r^w = c_r^w + \varepsilon_r^w, r \in R_w, w \in W \quad (4.1.3.18)$$

Donde  $\varepsilon_r^w = \tau_r^w + \eta_r^w$ , es un término de error aleatorio asociado con la ruta bajo consideración y se asume que  $E(\varepsilon_r^w) = 0$  o  $E(C_r^w) = c_r^w$ .

El modelo Logit para la selección de ruta está planteado como se muestra en la ecuación (4.1.3.20).

$$\ln \left( \frac{h_r^w}{h_{r'}^w} \right) = -\theta (c_r^w - c_{r'}^w) \quad (4.1.3.19)$$

$$\ln \left( \frac{h_r^w}{h_{r'}^w} \right) = -\theta [(t_r^w - t_{r'}^w) + (u_r^w - u_{r'}^w) + (d_r^w - d_{r'}^w)] \quad (4.1.3.20)$$

Donde  $r$  y  $r'$  son rutas alternativas que conectan el mismo par origen-destino  $w$ , y  $\theta > 0$  es un parámetro dado, el cual se usa como medida acerca del grado de conocimiento de los pasajeros

sobre el costo de viaje en la ruta. En general, si  $\theta$  tiende a infinito (conocimiento perfecto), los resultados del SUE se aproximan a los resultados de UE.

Si  $h_r^w < k_r^w$  y  $h_{r'}^w < k_{r'}^w$  entonces  $d_r^w = d_{r'}^w = 0$ , si, además, el total de la demanda se incrementa, la proporción de distribución del flujo de pasajeros entre las dos rutas permanece igual hasta que uno o más links en alguna ruta son saturadas.

Si  $h_{r'}^w = k_{r'}^w$  (flujo igual a capacidad) y se da un incremento en la demanda total, puede causar congestión sobre la ruta  $r'$ , generando una cola de pasajeros en alguna estación(es) que a la vez contribuye con un incremento de la demora por sobrecarga de pasajeros y que a la vez afecta la atractibilidad de la ruta.

Los autores adaptan el algoritmo de Shell (1995) de asignación de tráfico con colas con estrictas restricciones de capacidad para asignación de tránsito con congestión, para ello reescriben la ecuación (4.1.3.7) como se muestra en la ecuación (4.1.3.21)

$$h_r^w = \exp(-\theta(t_r^w + u_r^w) + m_r^w + l_w) = \exp(-\theta(t_r^w + u_r^w)) \prod_{s \in r} M_s L_w \quad (4.1.3.21)$$

Donde la ruta  $r$  conecta el par OD  $w$ ,  $L_w = \exp(l_w)$  es un factor para  $w$  OD,  $M_s = \exp(m_s)$  es un factor para el link  $s$ .

El algoritmo propuesto por los autores para solucionar este problema es el siguiente (Lam et al. 1999):

Paso 1. Inicialización

Hacer  $M_s^{(n)} = 1$  para todos los arcos  $s \in \bar{A}$  y  $L_s^{(n)} = 1$  para todos los pares OD  $w$

$n=1$

Paso 2. Iteración

Si las condiciones de convergencia son satisfechas, entonces finalizar. De lo contrario se realizan los siguientes cálculos para cada  $s \in \bar{A}$

$$h_r^w(L^{(n)}, M^{(n)}) = \exp(-\theta(t_r^w + u_r^w)) \prod_{s \in r} M_s L_w,$$

$$\beta_r^{(n)} = k_s / \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} a_{sr} h_r^w(L^{(n)}, M^{(n)}),$$

$$M_s^{(n+1)} = \min[1, \beta_s^{(n)} M_s^{(n)}],$$

Por cada  $w \in W$ , calcular:

$$\beta_w^{(n)} = g_w / \sum_{r \in R_w} b_{wr} h_r^w(L^{(n)}, M^{(n)}),$$

$$L_w^{(n+1)} = \beta_w^{(n)} L_w^{(n)}.$$

Paso 3.

$n=n+1$

Volver al paso 2

Paso 4.

$$h_r^w = h_r^w(L, M)$$

Para cada  $s \in \bar{A}$ , calcular

$$v_s = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} a_{sr} h_r^w$$

$$d_s = -(\ln M_s) / \theta.$$

#### 4.1.4 Modelo de asignación de transporte público con modelo de confiabilidad Probit (Probit-Type Reliability-Based Transit Network Assignment)

En esta sección se presenta el modelo de asignación de transporte público para una red congestionada con servicios poco fiables planteado por Yang y Lam (2006). Los autores plantean un modelo apoyado por el modelo de asignación tipo Probit, juntos tienen el objetivo de formular el comportamiento de selección de ruta y predecir los flujos en las líneas de transporte público bajo condiciones no certeras, para ello una nueva función de desutilidad es desarrollada.

Este modelo plantea que los tiempos de viaje en vehículo son de carácter estocástico debido a los efectos de congestión del transporte público. La variación en los tiempos de viaje es causada por la incertidumbre de una red congestionada, esta variación en los tiempos de viajes influye en el tiempo de paso entre vehículos, por ende, éste también puede variar y a su vez afecta las frecuencias de ruta, y por lo tanto, los tiempos de espera de los usuarios en las paradas. Así, las variaciones en los tiempos de viaje hacen que los tiempos de espera y demora, sean de carácter estocástico, ante esto los pasajeros seleccionan su ruta bajo incertidumbre, en consecuencia, se espera que la selección de ruta se realice con base en una función de desutilidad percibida.

Supuestos del modelo:

- El tiempo de viaje en vehículo en cada segmento de línea se asume como una variable aleatoria independiente que sigue una distribución normal  $N(\mu_e, \sigma_e^2)$ , donde  $\mu_e$  es la media del tiempo de viaje y  $\sigma_e$  es la desviación estándar, de la cual se sabe que  $\sigma_e =$



$\beta_e \sqrt{\mu_e}$  donde  $\beta_e$  es una constante que depende del tipo de segmento de línea. Esta variable depende de la variación de los tiempos de viaje en vehículo por las rutas.

- Los tiempos de viaje en vehículo por las rutas se suponen variables de carácter determinístico y como variables exógenas.
- La demanda de cada par O-D está dada y es fija.
- Las variables: tiempo de espera, demoras y frecuencias elásticas, son variables endógenas, calculadas en el modelo de asignación.
- El tiempo de viaje por las secciones de ruta por cada ruta se considera variable y sigue una distribución normal, así pues, el tiempo de viaje en vehículo en la ruta  $r$  entre el par origen-destino  $w$   $t_r^w \sim N(\mu_r^w, \sigma_r^{w^2})$ , donde el tiempo esperado de viaje en la ruta  $r$  entre el par OD  $w$ ,  $\mu_r^w$  es  $\mu_r^w = \sum_s a_{er}^w \cdot \mu_e$  y la varianza del tiempo de viaje en vehículo por la ruta  $r$  entre el par  $w$  (OD) es  $\sigma_r^{w^2} = \sum_s a_{er}^w \cdot \sigma_e^2$ , donde  $\mu_e$  y  $\sigma_e$  son la media y la desviación estándar del tiempo de viaje en vehículo en el segmento de línea  $e$ , respectivamente.
- La fiabilidad de los diferentes modos de transporte es reflejada por la variación del tiempo de viaje en el vehículo. El nivel de fiabilidad del servicio de transporte por rutas puede ser especificado explícitamente en el modelo.
- En una red de transporte congestionada bajo condiciones de incertidumbre, la variabilidad de los tiempos de viaje en vehículo tiene incertidumbre debida al no conocimiento por parte de los pasajeros sobre el tiempo de llegada a su destino. Para formular los comportamientos ante el riesgo, se formuló una función de desutilidad.
- Se asume que todos los pasajeros presentan aversión al riesgo bajo condiciones poco fiables. Sin embargo, en la realidad, puede haber pasajeros que presenten otro tipo de comportamientos, como un comportamiento neutral ante el riesgo.
- Los usuarios no tienen un conocimiento perfecto de las condiciones de tráfico y pueden seleccionar la ruta que minimiza la desutilidad percibida de su viaje.

Se considera una red  $G(N, S, E)$ , donde  $N$  es el grupo de nodos,  $S$  es el grupo de secciones de ruta y  $E$  es el grupo de segmentos de líneas. Los autores retoman las definiciones de una red de transporte (línea, sección de línea, ruta, etc.) definidos por De Cea y Fernández (1993) presentadas en la sección 4.1.2.

- W: Conjunto de pares origen-destino (O-D)
- S: Conjunto de todas las secciones de ruta
- L: Conjunto de todas las líneas
- E: Conjunto de todos los segmentos de líneas
- $R_w$ : Conjunto de rutas entre el par O-D  $w$
- $q_w$ : Demanda de pasajeros entre el par O-D  $w$
- $v_e$ : Flujo de pasajeros en el segmento de línea  $e$ ,
- $h_r^w$ : Flujo de pasajeros en la ruta  $r$  entre el par O-D  $w$

$k_e$ : Capacidad del segmento de línea  $e$   
 $t_r^w$ : Tiempo esperado de viaje en la ruta  $r$  entre el par origen-destino  $w$   
 $a_{er}^w$ : Elemento de segmento de ruta que incide sobre el par OD  $w$

La formulación del modelo de Asignación de transporte público tipo Probit que los citados autores presentan se muestran de la ecuación (4.1.4.1) a la ecuación (4.1.4.5). Cabe resaltar que el modelo fue formulado a partir de modelo de asignación tradicional SUE propuesto por Sheffi (1985)

$$\min\left\{-\sum_{w \in W} q_w S[C_w] + \sum_{e \in E} v_e t_e(v_e) - \sum_{e \in E} \int_0^{v_e} t_e(z) dz\right\} \quad (4.1.4.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{r \in R_w} h_r^w = q_w, w \in W \quad (4.1.4.2)$$

$$v_e = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} a_{er}^w h_r^w \quad e \in E \quad (4.1.4.3)$$

$$v_e(f) < k_e(f), e \in E \quad (4.1.4.4)$$

$$h_r^w \geq 0 \quad r \in R_w, w \in W \quad (4.1.4.5)$$

$$\text{Donde } S_w[C_w] = E \left[ \min_{r \in R_w} \{C_r^w\} | c_w \right] \quad (4.1.4.6)$$

Variable de decisión:

$$a_{er}^w = \begin{cases} 1 & \text{si el segmento de línea } e \text{ es parte de la ruta } r \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

La ecuación (4.1.4.2) es la relación entre el flujo OD y el flujo de pasajeros en las rutas (conservación del flujo).

La ecuación (4.1.4.3) es la relación entre el flujo de las secciones de línea y el flujo de las rutas ( $a_{er}$ , los cuales son iguales a 1 si la línea  $e$  pertenece a la ruta  $r$  y 0 en cualquier otro caso).

La ecuación (4.1.4.4) es la restricción de capacidad.

El tiempo de ciclo está determinado por la ecuación (4.1.4.7).

$$T_l(v) = \rho t_o^l + \sum_{e \in l} t_e^l + \sum_{n \in l} dt_n^l(v) \quad (4.1.4.7)$$

Donde:

$t_o^l$ : tiempo en el terminal del vehículo en la línea  $l$ ,

$t_e^l$ : tiempo de viaje en el segmento de línea  $e$  de la línea  $l$ ,

$dt_n^l(v)$ : tiempo de espera para un vehículo en la línea  $l$ .

Si hay un terminal en la línea circular  $\rho = 1$ , cuando hay dos terminales en la misma línea, entonces  $\rho = 2$ .

Como el tiempo de trayecto para uno vehículo en la línea  $l$  es variable, su frecuencia puede ser elástica de acuerdo al nivel de congestión. Si el tamaño de flota ( $N_l$ ) es fijo, así la frecuencia elástica de la línea  $l$  está determinada (4.1.4.8). Donde  $f_{ol}$  es la frecuencia nominal.

$$f_l = \begin{cases} \frac{N_l}{T_l(v)} & \text{si } \frac{N_l}{T_l(v)} < f_{ol} \\ f_{ol} & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4.1.4.8)$$

Los costos de cada segmento de línea, se conforman por tres componentes: tiempo de viaje  $t_e$ , tiempo de espera  $u_e$  y demora por sobre carga de pasajeros  $d_e$ , como se representa en la ecuación (4.1.4.9).

$$C_e = t_e + u_e + d_e, e \in E \quad (4.1.4.9)$$

El tiempo de espera en las paradas está determinado por la ecuación (4.1.4.10).

$$u_e = \frac{\alpha}{f_e} \quad (4.1.4.10)$$

La demora por sobrecarga de pasajeros causada por restricciones de capacidad se representa por la ecuación (4.1.4.11)

$$d_s \begin{cases} = 0, & \text{si } v_e < k_e \\ \geq 0, & \text{si } v_e = k_e \end{cases} \quad (4.1.4.11)$$

Yang y Lam(2006) proponen el modelo de asignación de transporte público con modelo de confiabilidad Probit (Probit –Type Reliability-Based SUE: RSUE) en el cual los usuarios seleccionan su ruta con base en la desutilidad mínima percibida. La formulación del modelo de se presenta de la ecuación (4.1.4.12) a (4.1.4.16).

$$\min \left\{ -\sum_{w \in W} q_w S[V_w] + \sum_{r \in R_w} h_r^w U_r^w(h_r^w) - \sum_{r \in R_w} \int_0^{h_r^w} U_r^w(z) dz \right\} \quad (4.1.4.12)$$

Sujeto a:

$$\sum_{r \in R_w} h_r^w = q_w, w \in W \quad (4.1.4.13)$$

$$v_e = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} a_{er}^w h_r^w, e \in E \quad (4.1.4.14)$$

$$v_e(f) < k_e(f), e \in E \quad (4.1.4.15)$$

$$h_r^w \geq 0 \quad r \in R_w, \quad w \in W \quad (4.1.4.16)$$

$$\text{Donde } S_w[V_w] = E \left[ \min_{r \in R_w} \{V_r^w\} | V_w \right] \quad (4.1.4.17)$$

A continuación, se presentan las ecuaciones de desutilidad que perciben los usuarios con relación al tiempo de viaje, el tiempo de espera, la demora por sobrecarga de pasajeros y la tarifa por abordar determinada ruta. El tiempo de espera y la demora se consideran variables endógenas, mientras que el tiempo de viaje como ya se mencionó es una variable exógena que sigue una distribución normal.

La función de desutilidad del tiempo de viaje en la ruta  $r$ , para comportamientos tomados bajo riesgo, está determinada por la ecuación (4.1.4.18). Donde  $\alpha_t, \gamma_t$  y  $\omega_t$  son parámetros de los tres componentes en la función cuadrática del tiempo de viaje por la ruta  $r$  entre el par OD  $w$ .

$$U_t(t_r^w) = \alpha_t \cdot t_r^{w^2} + \gamma_t \cdot t_r^w + \omega_t, \quad \alpha_t > 0, \gamma_t > 0 \quad (4.1.4.18)$$

La desutilidad esperada del tiempo de viaje en la ruta  $r$  está determinada por la ecuación (4.1.4.19).

$$\begin{aligned} \eta_{tr}^w &= \int N(\mu_r^w, \sigma_r^{w^2}) \cdot U_t(t_r^w) dt_r^w \\ &= \alpha_t \cdot \sigma_r^{w^2} + \alpha_t \cdot \mu_r^{w^2} + \gamma_t \cdot \mu_r^w + \omega_t \\ &= \alpha_t \cdot (\sum_s a_{er}^w \cdot \beta_e^2 \cdot \mu_e^2) + \alpha_t (\sum_s a_{er}^w \cdot \mu_e)^2 + \gamma_t (\sum_s a_{er}^w \cdot \mu_e) + \omega_t \end{aligned} \quad (4.1.4.19)$$

La función de desutilidad del pasajero que experimenta debido a los tiempos de espera en las paradas se presenta en la ecuación (4.1.4.20), donde  $\alpha_{ue}, \gamma_{ue}$  y  $\omega_{ue}$  son parámetros de los tres términos en la función cuadrática de tiempos de espera de los pasajeros.

$$\eta_{ue}(u_e^w) = \alpha_{ue} \cdot u_e^{w^2} + \gamma_{ue} \cdot u_e^w + \omega_{ue}, \quad \alpha_{ue} > 0, \gamma_{ue} > 0 \quad (4.1.4.20)$$

De igual forma, la desutilidad percibida por demora debida a la sobrecarga de pasajeros está determinada por la ecuación (4.1.4.21), donde  $\alpha_{de}, \gamma_{de}$  y  $\omega_{de}$  son parámetros de los tres términos en la función cuadrática de demora de los pasajeros.

$$\eta_{de}(d_e^w) = \alpha_{de} \cdot d_e^2 + \gamma_{de} \cdot d_e + \omega_{de}, \quad \alpha_{de} > 0, \gamma_{de} > 0 \quad (4.1.4.21)$$

La desutilidad percibida de acuerdo a una tarifa  $p$  por ruta y al valor del tiempo  $\theta$ , se muestra en la ecuación (4.1.4.22), donde  $\omega_f, \alpha_f$  y  $\gamma_f$  son parámetros de los tres componentes en la función cuadrática de la tarifa  $p_r^w$  en la ruta  $r$  entre el par origen-destino  $w$ .

$$\eta_f(p) = \alpha_f \cdot (\theta p_r^w)^2 + \gamma_f \cdot \theta p_r^w + \omega_f, \quad \alpha_f > 0, \gamma_f > 0 \quad (4.1.4.22)$$

Con base en las cuatro ecuaciones de desutilidad percibidas por el usuario (relacionadas al tiempo de viaje, tiempo de espera, la demora y la tarifa), la desutilidad total esperada por la ruta  $r$  está determinada por la ecuación (4.1.4.23), donde  $\phi_t, \phi_{ue}, \phi_{de}$  y  $\phi_f$  son los parámetros de peso del tiempo de viaje, tiempo de espera de los pasajeros en las paradas, demora por sobre carga de pasajeros y la desutilidad debida a la tarifa del viaje respectivamente.

$$u_r^w = \phi_t \cdot \eta_{tr}^w + \phi_{ue} \sum_e a_{er}^w \eta_{ue} + \phi_{de} \sum_e a_{er}^w \eta_{de} + \phi_f \eta_f, e \in E \quad (4.1.4.23)$$

Si los parámetros  $\alpha$  y  $\omega$  de las ecuaciones de desutilidad percibida (de la ecuación 4.1.4.19 a la ecuación 4.1.4.22) son iguales a cero, implica que los pasajeros harán la selección de ruta con base en el mínimo del costo y tiempo de viaje esperado. Sin embargo, si no hay variación en los tiempos de viaje para cada segmento de línea, entonces el problema de selección de ruta se convierte en el modelo de asignación tradicional SUE (SUE es un caso especial de este modelo). Las ecuaciones de desutilidad, representan el comportamiento de los pasajeros ante el riesgo cuando los parámetros  $\alpha$  y  $\gamma$  son mayores a cero y  $\omega$  es cero.

En una red congestionada con incertidumbre, los pasajeros no tiene información perfecta sobre las características de los viajes. Por lo cual se percibe un error con base en la desutilidad de la ruta  $r$ ,  $\epsilon_r^w$  (error en la desutilidad en la ruta  $r$  entre el par origen-destino  $w$ ), este error sigue una distribución normal:  $\epsilon_r^w \sim N(U_r^w, \xi_r^w U_r^w)$ , donde  $\xi_r^w U_r^w$  es la varianza del error percibido  $\epsilon_r^w$  en la ruta  $r$ . Así, la desutilidad percibida al usar la ruta  $r$  entre el par origen-destino  $w$  está determinada por la ecuación (4.1.4.24).

$$V_r^w = U_r^w + \epsilon_r^w \quad (4.1.4.24)$$

El algoritmo de solución que proponen los autores es basado en la simulación Monte Carlo, en éste se hace uso del modelo de asignación tipo Probit como generador de una solución semilla para luego ejecutar el modelo de asignación de transporte público con modelo de confiabilidad Probit (RSUE). A continuación se presenta el pseudocódigo utilizado:

**Paso 0.** Dar la demanda total de pasajeros O-D y el máximo número de iteraciones  $k_{max}$ .

**Paso 1.** Generar el vector de tiempos de viaje en vehículo por rutas, dar la media y la desviación estándar de la distribución normal.

**Paso 2.** Calcular el tiempo de recorrido y frecuencias por línea,  $K=1$ .

**Paso 3.** Ejecutar el modelo de asignación tipo *Probit* con restricciones de capacidad.

**Paso 4.** Si  $k < k_{max}$  entonces  $k=k+1$  e ir al paso 1, de lo contrario parar.

**Paso 5.** Recopilar estadísticas para determinar los tiempos de espera en las paradas y la distribución de la demora por sobrecarga de pasajeros. Luego, calcular el tiempo esperado de viaje, tiempos de espera y demoras por sobrecarga en las paradas.

**Paso 6.** Ejecutar la asignación de transporte público “Reliability-based” con los resultados del paso 5, en el cual el método de promedios sucesivos es usado para calcular las frecuencias y el flujo de pasajeros. Durante el proceso de iteración, si  $\left| f_l^{(n+1)} - f_l^{(n)} \right| < \tau \forall l \in L$  entonces parar; en otro caso,  $n=n+1$  y continuar la iteración de asignación. Donde,  $\tau$  es una tolerancia previamente determinada,  $n$  es el número de iteraciones para calcular las frecuencias elásticas y el flujo de pasajeros ( $v_e$ ).

En el ejemplo numérico que presentan los autores, se maneja una red conformada por cuatro líneas de transporte: línea expresa hacia el aeropuerto, línea del Ferrocarril, línea 1 y 2 de autobús. Fijan  $\tau$ , parámetro de convergencia, en 0.005 y los parámetros  $\alpha=\omega=0$  y  $\Upsilon=1$ . Se plantearon dos escenarios con base en los parámetros  $\beta_1$  y  $\beta_2$  (grado de confiabilidad del modo ferrocarril y autobús respectivamente), para variar los tiempos de viaje, el primer escenario se planteó como  $\beta_1=0.1$  y  $\beta_2=0.3$  y el segundo escenario como  $\beta_1=0.1$  y  $\beta_2=1$ , esto dado que los tiempos de viaje en ferrocarril presentan un alto grado de confiabilidad, caso opuesto a los viajes realizados en autobús. Los resultados muestran que los resultados convergen en la séptima iteración y concluyen que los parámetros  $\beta$  afectan la convergencia del modelo, estos parámetros son directamente proporcionales a los tiempos de demora y a la desviación estándar que presenta el flujo de pasajeros, e inversamente proporcional al flujo de pasajeros; al realizar el incremento en  $\beta_2$ , el flujo de pasajeros en la línea de autobuses decrece. Además, se concluye que el modelo tradicional de asignación de transporte público SUE sobreestima los flujos para los segmentos de línea de los autobuses y subestima para los segmentos de línea del ferrocarril en comparación a los resultados que ofrece el modelo de asignación RSUE.

#### **4.1.5 Calibración y validación de modelos de asignación de transporte público**

En esta sección se presenta la metodología de validación y calibración de modelos de simulación de tráfico vehicular planteada por Barceló (2010), debido a la similitud con el modelo de asignación de transporte público y al software utilizado en esta tesis; las variables son diferentes pero la metodología planteada para calibración de los parámetros relevantes en la simulación de tráfico puede ser aplicada para determinar los valores de los parámetros de la asignación de transporte público.

Barceló (2010) afirma que los modelos deben ser capaces de representar el comportamiento real de los sistemas, para posteriormente tomar decisiones confiables con base en ellos. El proceso mediante el cual los modelos se acercan a la realidad de forma significativa, es mediante la validación y la obtención de conocimiento del modelo, este último en el sentido de mejorar el modelo hasta ser aceptable. La validación es un proceso iterativo que estima los parámetros del modelo, mediante la comparación del comportamiento del modelo y el sistema real actual, utilizando las discrepancias junto con el conocimiento obtenido para mejorar el modelo.

La calibración es el proceso que determina el valor de los parámetros del modelo para que éste sea una representación cercana a la realidad del sistema bajo estudio (modelo válido). Un

modelo es válido si la probabilidad de la diferencia entre la realidad y el resultado de la simulación es menor que una diferencia tolerable específica  $d$  dentro de un nivel de significancia  $\alpha$  (ecuación 4.1.5.1).  $\alpha$  indica la certeza del resultado y  $d$ , el límite de la diferencia entre el modelo y la realidad.  $\alpha$  y  $d$  dependen de la calidad de la información disponible.

$$P\{|realidad - resultado\ del\ modelo| \leq d\} > \alpha \quad (4.1.5.1)$$

La metodología básica para la validación de modelos de simulación (ver figura 4.1) asume que los datos disponibles para la comparación del modelo son confiables o sin errores. La metodología inicia con un proceso de recolección de datos, los cuales posteriormente pasan por un proceso de filtrado (extracción de datos no confiables) y completado de datos faltantes, posteriormente se ingresan al modelo, del cual se obtienen los resultados de la variable de interés. La validación consiste en recolectar datos de la simulación y compararlos con mediciones del sistema real mediante métodos de análisis estadístico, para determinar si el modelo representa significativamente la realidad, en cuyo caso se dice que se cuenta con un modelo validado, de otra manera, dependiendo de la situación, se debe revisar el procesamiento de datos, recolectar nuevos o más datos para refinar o cambiar los datos de entrada al modelo.

Para la calibración del modelo es aconsejable dividir el problema principal en subproblemas, y tomar en cuenta la naturaleza de los parámetros a ser calibrados, puesto que éstos pueden ser parámetros locales o globales, antes de recurrir a procesos simultáneos de calibración.

El mejor método de calibración es mediante la formulación de un problema de optimización, el cual tiene por función objetivo minimizar la distancia entre los resultados de la variable de interés obtenidos mediante la simulación y los valores observados en el sistema real, y tiene como restricciones, el grupo de valores factibles para cada parámetro a calibrar y de los cuales depende la variable obtenida mediante simulación. Entre los ejemplos citados a cerca del problema de optimización está el propuesto por La FHWA (2004), el cual incluye la variabilidad procedente de las réplicas de la simulación, la formulación del problema se muestra en las ecuaciones (4.1.5.2) y (4.1.5.3).

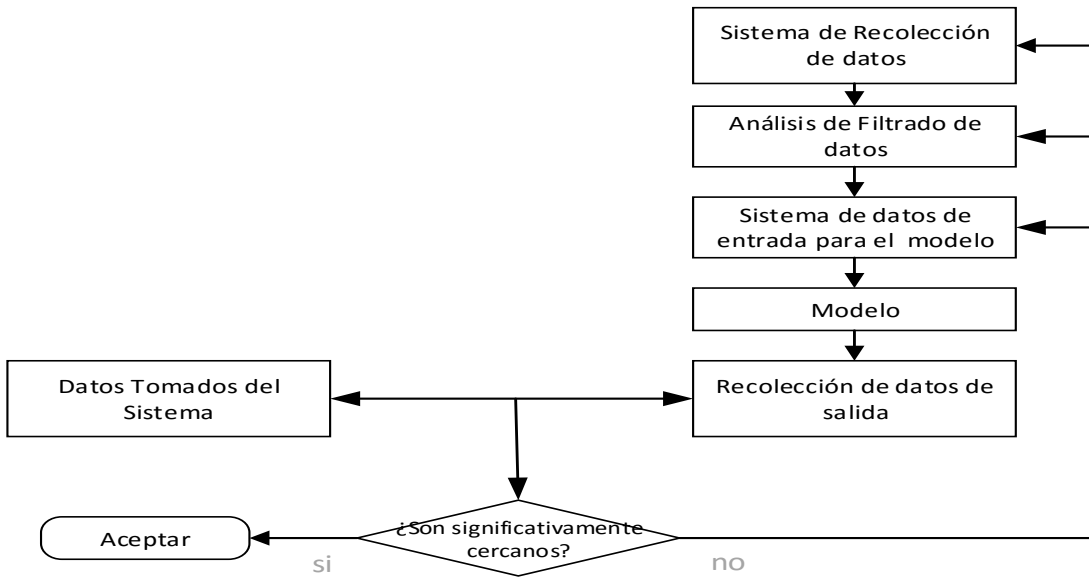


Figura 4.1 Metodología para la validación de Modelos de Simulación-Fuente: Barceló (2010)

$$\min \left\{ MSE = \frac{1}{R} \sum_r (q_{ltr} - q_l)^2 \right\} \quad (4.1.5.2)$$

Sujeto a:

$$p_m^{\min} \leq p_m \leq p_m^{\max} \quad (4.1.5.3)$$

Donde:

$MSE$ : es el error cuadrado medio, la suma del error cuadrático medio sobre el número de réplicas independientes de la simulación ( $R$ ),

$q_{ltr}$ : es el flujo simulado en la ubicación  $l$  y el tiempo  $t$  para la replica  $r$  de la simulación,

$q_l$ : son las medidas del flujo en la ubicación  $l$  y el tiempo  $t$ ,

$p$ : es el grupo de parámetros,

$p_m$ : es el parámetro  $m$  a calibrar y

$p_m^{\min}$  y  $p_m^{\max}$ : son los límites inferior y superior respectivamente del rango de valores permitido para el parámetro  $p_m$ , los cuales son estimados mediante un análisis previo.

A partir de este modelo, Barceló (2010) plantea una generalización del modelo, el cual se presenta en las ecuaciones (4.1.5.4) y (4.1.5.5)

$$\min f(M_{obs}, M_{sim}) \quad (4.1.5.4)$$

Sujeto a:



$$L_i \leq \beta_i \leq U_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4.1.5.5)$$

Donde:

$f$ : es la función de los datos observados y simulados de la variable de rendimiento,

$M_{obs}$  y  $M_{sim}$ : cuyos argumentos son componentes del vector  $\beta$ ,

$L_i$  y  $U_i$ : son los límites inferior y superior respectivamente del parámetro  $\beta_i$ .

Las funciones objetivo (dado que  $x_i$  y  $y_i$  son la  $i$ -ésima medición y el valor observado, respectivamente) pueden ser:

- La raíz del error cuadrático medio (RMSE), el cual cuantifica el error global (ecuación 4.1.5.6).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (4.1.5.6)$$

- La raíz del error cuadrático medio normalizado (RMSNE), el cual suministra información sobre la magnitud de los errores relativos a la medida promedio (ecuación 4.1.5.7).

$$RMSNE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{x_i - y_i}{y_i} \right)^2} \quad (4.1.5.7)$$

- El error medio ( $ME$ ) (ecuación 4.1.5.8).

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i - y_i \quad (4.1.5.8)$$

- El error medio normalizado ( $MNE$ ) (ecuación 4.1.5.9).

$$MNE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{x_i - y_i}{y_i} \quad (4.1.5.9)$$

- Geoffrey E. Havers' statistic ( $GEH$ )

Sin embargo, también hay funciones que unen las mediciones para proveer una visión global, en las cuales se calcula el índice para cada estación de conteo (ecuación 4.1.5.10).

$$GEH_i = \sqrt{\frac{2(x_i - y_i)^2}{x_i + y_i}} \quad (4.1.5.10).$$

Luego se estima un índice global siguiendo el siguiente algoritmo:

For  $i = m$  (número de estaciones de conteo)

*if*  $GEH_i \leq 5$ , entonces  $GEH_i = 1$

*de lo contrario*  $GEH_i = 0$

*end if*

*End for.*

$$\text{Hacer } GEH = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m GEH_i$$

*If*  $GEH \geq 85\%$  entonces se acepta el modelo

*En otro caso se rechaza el modelo*

*End if*

Este procedimiento se interpreta de la siguiente manera: si la desviación de los valores simulados con respecto a las mediciones es menor que 5% en al menos el 85% de los casos, se acepta el modelo (modelo válido), de lo contrario se rechaza el modelo.

- Indicador de Theil ( $U$ )

Tomando en cuenta que las series de mediciones y valores obtenidos de la simulación puede ser recolectados en intervalos de tiempo regulares, éstos pueden interpretarse como series de tiempo; de igual forma que los datos individuales son utilizados para determinar qué tan cercano es el modelo a la realidad, las series de tiempo también pueden usarse para determinar esta situación mediante métodos estadísticos que realizan la comparación entre las series desglosadas de los valores simulados y las mediciones obtenidas de la realidad; tal como el indicador global de Theil ( $U$ ), el cual suministra una medida normalizada del error relativo que suaviza los impactos de grandes errores (ecuación 4.1.5.11).

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i)^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i)^2}} \quad (4.1.5.11)$$

Donde  $0 \leq U \leq 1$ , con  $U = 0$  para un ajuste perfecto, entre valores observados y simulados y  $x_i = y_i$  para  $i = 1 - N$ . Para  $U \leq 0.2$ , las series pueden ser aceptadas como iguales, es decir el modelo es representativo y para  $U > 0.2$  el modelo es rechazado.

El indicador de Theil puede ser descompuesto en tres proporciones, mostradas en las ecuaciones (4.1.5.12) a (4.1.5.14).

$$U_m = \frac{N(\bar{x} - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (4.1.5.12)$$

$$U_s = \frac{N(\sigma_x - \sigma_y)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (4.1.5.13)$$

$$U_c = \frac{2N(1-\rho)\sigma_x\sigma_y}{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (4.1.5.14)$$

Donde  $\bar{x}$  y  $\bar{y}$  son las medias de los valores observados y simulados, respectivamente,  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  son sus desviaciones estándar y  $\rho$  es el coeficiente de correlación. Ellos aseguran que  $U_m + U_s + U_c = 1$ . La proporción de sesgo ( $U_m$ ) es una medida del error sistemático, valores cercanos a 1 indican un sesgo inaceptable. La proporción de varianza ( $U_s$ ) es una medida de que también los valores simulados replican la variabilidad de las series observadas, valores cercanos a 1 muestran que las series simuladas tienen una variabilidad significativamente diferente. La proporción de la covarianza ( $U_c$ ) mide el error restante no sistemático, por lo que éste puede ser cercano a 1 para un buen ajuste.

En cuanto a la escogencia de parámetros a calibrar, el autor plantea que se debe realizar un diseño de experimentos factorial. Se cita el trabajo de Ciuffo, Punzo, y Torrieri (2007), el cual se identifican los parámetros relevantes a calibrar, posteriormente se proponen rangos de variación factibles para estos parámetros con su respectivo incremento discreto, luego se realizan corridas de la simulación con replicas independientes, para realizar un análisis estadístico de varianza ANOVA por sus siglas en inglés (analysis of variance) para mayor información sobre este análisis estadístico remitirse a Rossi y Mirtchev (2016), este análisis determina el grado de significancia de los parámetros y la combinación de parámetros más relevantes para determinados casos.

Los métodos de clásicos de optimización son determinísticos, no toman en cuenta el carácter estocástico de los fenómenos de tráfico ni la interacción entre sus parámetros, por lo que se hace necesario la utilización de métodos de optimización explícitamente diseñados para modelos de optimización heurística de sistemas estocásticos, como el método SPSA (Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation), el cual depende de una aproximación del gradiente formado a partir del ruido de las mediciones de la función objetivo, esta aproximación se presenta en la ecuación (4.1.5.15).

$$\hat{g}_k(\hat{\theta}_k) = \frac{L(\hat{\theta}_k + c_k \Delta_k) - L(\hat{\theta}_k - c_k \Delta_k)}{2c_k} [\Delta_{k1}^{-1}, \Delta_{k2}^{-1}, \dots, \Delta_{kp}^{-1}]^T \quad (4.1.5.15)$$

Donde  $\Delta_{ki}$  es el  $i$ -ésimo componente del vector  $\Delta_k$  de perturbaciones simultáneas,  $c_k$  es un escalar positivo, y  $L(\theta)$  es la función objetivo como medida de rendimiento del sistema en términos de un vector continuo  $\theta$  con  $p$  parámetros, de los cuales depende el modelo. Los valores de los parámetros deben ser determinados para obtener el mejor valor de la función objetivo. Esta última puede ser cualquier función de las antes mencionadas en términos de  $x_i(\theta)$ .

El gradiente de aproximación  $g(\theta) = \partial L(\theta)/\partial \theta$ , es construido a partir del ruido de  $L(\theta)$  que se muestra en la ecuación (4.1.5.16)

$$L(\hat{\theta}) = L(\theta) + \varepsilon \quad (4.1.5.16)$$

Donde  $\varepsilon$  es una función de error aleatorio. El algoritmo básico SPSA con restricciones es en general de la forma recursiva que se presenta en la ecuación (4.1.5.17).

$$\hat{\theta}_{k+1} = P[\hat{\theta}_k - a_k \hat{g}_k(\hat{\theta}_k)] \quad (4.1.5.17)$$

Donde  $\hat{g}_k(\hat{\theta}_k)$  es la perturbación simultanea estimada del gradiente  $g(\theta)$  en la iteración  $\hat{\theta}_k$ ,  $[\Delta_{k1}^{-1}, \Delta_{k2}^{-1}, \dots, \Delta_{kp}^{-1}]^T$  es el vector de perturbación aleatoria.

Las principales condiciones de convergencia del algoritmo SPSA requieren lo siguiente:

1. Que los coeficientes escales no negativos  $a_k > 0$  y  $c_k > 0$  deben satisfacer:  
 For  $a_k$  y  $c_k \rightarrow 0$ :  $\sum_{k=0}^{\infty} a_k = \infty$  y  $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_k^2}{c_k^2} < \infty$
2. Condición de acotación:  $\sup_{k \geq 0} \|\hat{\theta}_k\| < \infty$
3. Medición de ruido: el radio de la medida de perturbación debe ser tal que:  $E[(L(\hat{\theta}_k \pm c_k \Delta_k)/\Delta_{ki})^2]$  es limitado uniformemente sobre  $k$  y  $i$ .
4. Propiedades Estadísticas de la Perturbación: los  $\Delta_{ki}$  son independientes de todos los  $k$ ,  $i$ , idénticamente distribuidos para todas las  $i$  en cada  $k$ , simétricamente distribuidas sobre cero y uniformemente limitadas en magnitud por todas la  $k, i$ .

Las condiciones 1,3 y 4 determinan el crecimiento de  $a_k, c_k$  y la perturbación aleatoria  $\Delta_k$  y la suma cuadrada de la condición 1 balancea el decaimiento en  $a_k$  frente a  $c_k$  para asegurar que la actualización en el movimiento de  $\hat{\theta}_k$  a  $\hat{\theta}_{k+1}$  sea adecuado.

El algoritmo SPSA consta de seis pasos: 1. Inicialización y selección de coeficientes, 2. generación del vector de perturbaciones simultaneas, 3. Evaluación de la función objetivo, 4. Aproximación del gradiente, 5. Actualización de la estimación  $\theta$  y 6. Realización de la prueba de aceptación.

En la fase de inicialización y selección de coeficientes se debe realizar la estimación inicial de  $\hat{\theta}_0$  y de los coeficientes no negativos  $a, c, A, \alpha$  y  $\gamma$  en las secuencias de

incremento presentadas en las ecuaciones (4.1.5.18) y (4.1.5.19). Los valores efectivos teóricos para  $\alpha$  y  $\gamma$  son 0.602 y 0.101, respectivamente,  $a, c$  y  $A$  pueden ser determinados con base en directrices prácticas.

$$a_k = \frac{a}{(k+a+A)^\alpha} \quad (4.1.5.18)$$

$$c_k = \frac{c}{(k+1)^\gamma} \quad (4.1.5.19)$$

En la fase de generación del vector de perturbaciones simultaneas se genera por Monte Carlo un vector de perturbaciones aleatorias de p-dimensiones  $\Delta_k$ , donde cada componente  $p$  de  $\Delta_k$  es generado independientemente bajo una distribución de probabilidad con media cero que satisfaga la condición 3 (La distribución Bernoulli  $\pm 1$  hace que las perturbaciones cumplan con la ecuación 3).

En el paso de evaluación de la función objetivo se debe obtener dos medidas de la función de pérdida (una función de pérdida es una función que relaciona un evento o un elemento de un espacio de muestreo con un número real que representa el costo económico asociado con el evento) basada en la perturbación simultanea alrededor del actual  $\hat{\theta}_k$  (ecuación 4.1.5.20) con los actuales  $c_k, a_k$  y  $\Delta_k$ . Es decir, se debe realizar dos corridas con las correspondientes perturbaciones de los valores de los parámetros a ser calibrados.

$$L(\hat{\theta}_k + c_k \Delta_k) \text{ y } L(\hat{\theta}_k - c_k \Delta_k) \quad (4.1.5.20)$$

En el paso 4: aproximación del gradiente se genera la aproximación de la perturbación simultánea al gradiente desconocido  $g_k(\hat{\theta}_k)$  de acuerdo a la ecuación (4.1.5.21).

$$\hat{g}_k(\hat{\theta}_k) = \frac{L(\hat{\theta}_k + c_k \Delta_k) - L(\hat{\theta}_k - c_k \Delta_k)}{2c_k} [\Delta_{k1}^{-1}, \Delta_{k2}^{-1}, \dots, \Delta_{kp}^{-1}]^T \quad (4.1.5.21)$$

En el paso 5, se debe actualizar la estimación  $\theta$  Usando la ecuación (4.1.5.22)

$$\hat{\theta}_{k+1} = P[\hat{\theta}_k - a_k \hat{g}_k(\hat{\theta}_k)] \quad (4.1.5.22)$$

En el paso 6 se debe verificar que se cumpla la ecuación (4.1.5.23), en la cual  $\varphi$  es el límite de error aceptable.

$$|L(\hat{\theta}_k) - L(\hat{\theta}_{k+1})| \leq \varphi \quad (4.1.5.22)$$

Si la ecuación (4.1.5.23) se cumple entonces el algoritmo termina. En el caso contrario se hace  $k=k+1$ , se actualiza  $a_k$  y  $c_k$  y se ejecuta nuevamente el algoritmo desde el paso 1.

## 4.2 Asignación de transporte público: Pumabús

De los modelos estudiados en la sección 4.1, se concluye que el modelo de asignación de transporte público estocástico confiable (RSUE) ofrece la estimación más cercana a la realidad puesto que además de incluir el fenómeno estocástico propio de las redes de transporte público congestionadas incluye una función de desutilidad percibida por el pasajero, la cual no considera el tiempo de viaje como única característica influyente en la selección de ruta, sin embargo el modelo RSUE no está disponible en TransCAD y llevar a cabo su programación implicaría un periodo de tiempo considerable que está fuera de los alcances de este trabajo. No obstante, en TransCAD 4.5 se encuentra el método de asignación de transporte público estocástico de equilibrio del usuario SUE, el cual provee mejores estimaciones que otros modelos disponibles en TransCAD (como el todo o nada, pathfinder, UE, entre otros) por considerar la capacidad de las líneas de transporte público y que la percepción del tiempo de viaje por parte de los usuarios es de carácter estocástico.

### 4.2.1 Modelo de asignación de transporte público estocástico de equilibrio del usuario (SUE) en TransCAD

Entre las variaciones del modelo SUE disponible en TransCAD con relación al modelo presentado en la sección 4.1.3, está la función de costos (ecuación 4.2.1.1) que representa tres tipos de efectos: la degradación del confort del pasajero como resultado del incremento de congestión, el incremento en el tiempo de permanencia en las paradas como resultado de la congestión a bordo del vehículo y la posibilidad de que el pasajero no pueda abordar el vehículo porque su capacidad ha sido sobrepasada. Además, este modelo toma en cuenta el valor del tiempo (*VOT*) que convierte el tiempo a valores monetarios (Caliper Corporation, 2004).

$$c_k = \sum_{l \in L} [\gamma_f f_l + VOT * (\gamma_w w_l + \gamma_x x_l)] + \sum_{l \in L} \left[ VOT * \left( \gamma_d d_l + \gamma_v t_i * \left( 1 + \alpha_i \left( \frac{v_i}{c_i} \right)^{\beta_i} \right) \right) \right] + \sum_{l \in L} [VOT * (\gamma_k k_j)] \quad (4.2.1.1)$$

Donde:

- l*: Índice de líneas usadas en la ruta *k*
- L*: Conjunto de líneas usadas en la ruta *k*
- i*: Índice del arco por el cual pasa la ruta *k*
- j*: Índice del arco de a pie por el cual pasa la ruta *k*
- J*: Conjunto de arcos de a pie usados por la ruta *k*
- c<sub>k</sub>*: Costo total de la ruta *k*, en términos monetarios
- VOT*: Valor del tiempo, en unidades monetarias por minuto
- f<sub>l</sub>*: Tarifa de la línea *l*
- w<sub>l</sub>*: Tiempo de espera por la línea *l*
- x<sub>l</sub>*: Tiempo de penalización por transferencia a la línea *l*
- γ<sub>f</sub>*: Peso de la tarifa
- γ<sub>w</sub>*: Peso del tiempo de espera

- $\gamma_x$ : Peso del tiempo de penalización por transferencia
- $d_i$ : Tiempo de permanencia en la parada asociada con el arco  $i$
- $v_i$ : Volumen en el arco  $i$
- $C_i$ : Capacidad por hora de los vehículos atendiendo el arco  $i$
- $t_i$ : Tiempo de viaje en vehículo del arco  $i$
- $\alpha_i$ : Parámetro alfa en la curva BRP del arco  $i$
- $\beta_i$ : Parámetro beta en la curva BRP del arco  $i$
- $\gamma_d$ : Peso del tiempo de permanencia
- $\gamma_v$ : Peso del tiempo de viaje en vehículo
- $k_j$ : Tiempo de viaje a pie por un arco de a pie  $j$
- $\gamma_k$ : Peso del tiempo de viaje a pie

Los parámetros  $\alpha_i$  y  $\beta_i$  se trabajan a nivel de arco, pero sólo pueden ser especificados por ruta, modo o como valores globales.

Este modelo calcula el tiempo de permanencia con base en el número de usuarios que abordan y descienden en una determinada parada como se presenta en la ecuación 4.2.1.2 (Caliper Corporation, 2004).

$$d = c_0 + c_1 v_{on} + c_2 v_{off} \quad (4.2.1.2)$$

Donde:

- $d$ : Tiempo de permanencia.
- $c_0$ : Una constante.
- $c_1$ : Peso del volumen que aborda ( $c_1 > 0$ ).
- $c_2$ : Peso del volumen que desciende ( $c_2 > 0$ ).
- $v_{on}$ : Volumen de pasajeros que abordan.
- $v_{off}$ : Volumen de pasajeros que descienden.

El tiempo de espera en cada estación se obtiene mediante la siguiente ecuación (4.2.1.3) (Caliper Corporation, 2004).

$$w = \alpha \cdot h = \alpha / f \quad (4.2.1.3)$$

Donde

- $f$ : Frecuencia de servicio de línea.
- $h$ : Tiempo de paso entre vehículos (headway).
- $w$ : Tiempo de espera.
- $\alpha$ : Parámetro de inter-arribo, como se ha mencionado en los modelos presentados en la sección 4.1,  $\alpha$  puede tomar por valores 0.5 o 1, esto depende de la distribución que siguen los tiempos de paso entre vehículos.

La capacidad está expresada en asientos por hora, como se muestra en la ecuación (4.2.1.4) (Caliper Corporation, 2004).

$$C = f * \text{capacidad del vehículo} \quad (4.2.1.4)$$

Este tipo de asignación toma en cuenta, además de los parámetros que determinan el nivel de congestión de cada arco, la distribución que siguen los errores de los tiempos de viaje en vehículo y a pie.

SUE es un método iterativo el cual inicia asignando los flujos al camino más corto para cada par origen-destino, tomando en cuenta los componentes aleatorios implícitos en los tiempos de viajes. Posteriormente, recalcula el costo generalizado con base en los flujos anteriormente asignados, el proceso se repite y generalmente en cada iteración un camino distinto es obtenido.

El modelo de asignación es resuelto mediante el algoritmo de promedios sucesivos, el cual después de un número considerable de iteraciones hace pequeñas modificaciones al flujo de cada arco de iteración a iteración hasta alcanzar el nivel de convergencia deseado, el algoritmo se basa en predeterminar el tamaño del movimiento y no en determinarlo con base en la solución actual. El paso básico del algoritmo de problemas de minimización esta descrito por la ecuación (4.2.1.5), donde  $x^n$  es el valor del vector de la variable de decisión (en este caso flujo en los arcos) en la n-ésima iteración,  $\alpha_n$  es un escalar que representa el tamaño del movimiento y  $d_n$  es un vector de dirección descendente calculado en  $x^n$ .  $d_n$  es definida como la diferencia entre dos cantidades, representada por la ecuación 4.2.1.6,  $y^n$  es el conjunto de flujos en los arcos obtenido con base en los tiempos de viaje medidos (Caliper Corporation, 2004).

$$x^{n+1} = x^n + \alpha_n \cdot d_n \quad (4.2.1.5)$$

$$d^n = y^n - x^n \quad (4.2.1.6)$$

Este algoritmo utiliza una secuencia predeterminada de incrementos que se muestra en la ecuación (4.2.1.7)

$$\alpha_n = \frac{K_1}{K_2 + n} \quad (4.2.1.7)$$

Donde:

- $\alpha_n$ : El incremento.
- $n$ : Número de iteraciones.
- $K_1, K_2$ : Parámetros, deben seleccionarse tal que cumplan las condiciones de las ecuaciones (4.2.1.8) y (4.2.1.9).



$$\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \rightarrow \infty \quad (4.2.1.8)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n^2 < \infty \quad (4.2.1.9)$$

La ecuación (4.2.1.8) garantiza que la secuencia alcance el valor deseado, no importa que tan lejos inicie. La ecuación (4.2.1.9) garantiza que la varianza de la variable aleatoria disminuya con las iteraciones. Una de las secuencias que cumple las citadas condiciones es  $\alpha_n = \frac{1}{n}$  ( $K_1 = 1$  y  $K_2 = 0$ ), por lo que la ecuación (4.2.1.5) se reescribe como la ecuación (4.2.1.10).

$$x^{n+1} = x^n + \frac{1}{n} \cdot (y^n - x^n) \quad (4.2.1.10)$$

El algoritmo de promedios sucesivos consta de 5 pasos, los cuales se enuncian a continuación (Sheffi, 1985):

Paso 0. Inicialización. Realizar una asignación de transporte público estocástico basada en el conjunto inicial de tiempos de viaje  $\{t_a^0\}$ . Esto genera un conjunto de flujos en los arcos  $\{x_a^1\}$ . Hacer  $n=1$ .

Paso 1. Actualizar. Hacer  $t_a^n = t_a(x_a^n), \forall a$ .

Paso 2. Determinar la dirección. Realizar una asignación estocástica basada en los tiempos de viaje actuales  $\{t_a^n\}$ . Ésta produce un patrón auxiliar de flujos de los arcos  $\{y_a^n\}$ .

Paso 3. Movimiento. Encontrar el nuevo patrón de flujos estableciendo

$$x_a^{n+1} = x_a^n + \frac{1}{n} \cdot (y_a^n - x_a^n) \quad (4.2.1.11)$$

Paso 4. Criterio de convergencia. Si el criterio de convergencia es alcanzado, entonces parar. Si no, hacer  $n=n+1$  e ir al paso 1.

En el paso 2, cabe señalar que la asignación estocástica se puede realizar mediante el método de carga estocástica de la red o por simulación Monte Carlo. Al considerar que el tiempo de viaje percibido es de carácter estocástico, implica que cada usuario percibe un tiempo de viaje diferente y por lo tanto puede haber diferentes selecciones de ruta para viajar entre un par origen-destino determinado. Así, retomando la ecuación del tiempo de viaje percibido en la ruta  $k$  entre el origen  $r$  y el destino  $s$  ( $C_k^{rs}$ ) del modelo de asignación SUE (ecuación 4.2.1.12), el método de carga estocástica de la red establece que la probabilidad de que la ruta  $k$  sea seleccionada es la probabilidad de que su tiempo de viaje sea el tiempo más bajo percibido entre todas las rutas (ecuación 4.2.1.13). Por último, el flujo asignado en la ruta  $k$  está

determinado por la ecuación (4.2.1.14), nótese que la asignación del flujo cambia de acuerdo a la varianza de la distribución de los tiempos de viaje en las rutas (Sheffi, 1985).

$$C_k^{rs} = c_k^{rs} + \varepsilon_k^{rs} \quad (4.2.1.12)$$

$$P_k^{rs} = P_r(C_k^{rs} \leq C_l^{rs} \forall l \in K_{rs}) \quad (4.2.1.13)$$

$$f_k^{rs} = q_{rs} P_k^{rs} \quad (4.2.1.14)$$

Para la asignación estocástica por simulación Monte Carlo, se debe considerar otro enfoque, en el cual los usuarios realizan la selección de ruta de acuerdo a la utilidad percibida, la satisfacción ( $\tilde{S}$ ) se define como un escalar el cual representa la utilidad esperada por el usuario para una alternativa  $k$ . Cada alternativa tiene una probabilidad de selección ( $P_k$ ), que está determinada por una función de selección poblacional ( $P_k(a)$ ) y una función de densidad ( $f(a)$ ), donde ( $a$ ) es un vector de características homogéneas de la población bajo estudio. Así,  $P_k$  se define por la ecuación (4.2.1.15). Sin embargo, esta ecuación no es fácil de evaluar, pero se puede tener una aproximación al obtener valores aleatorios de  $a$  a partir de la función de densidad ( $f(a)$ ) por simulación Monte Carlo, posteriormente calcular  $P_k(a)$  y promediar los resultados (Sheffi, 1985).

$$P_k = \int_a P_k(a) f(a) da \quad (4.2.1.15)$$

Para evaluar la calidad de los resultados, TransCAD incluye dos medidas de desempeño en el reporte de resultados: “la diferencia relativa” y el cambio máximo de flujo, ver ecuaciones (4.2.1.16) y (4.2.1.17). El “la diferencia relativa” es la diferencia entre el costo de la solución obtenida por UE y el costo obtenido por Todo o Nada (AON) dividido por el costo de la solución con UE; en el equilibrio la diferencia entre el costo total UE y el costo total AON es cero. El costo de la solución AON es una cota inferior de la solución obtenida en equilibrio y permite determinar la dirección de búsqueda de cada iteración. En cuanto a la ecuación (4.2.1.17), si el máximo cambio de flujo es grande en comparación con el impacto de un proyecto, la estimación no puede ser del todo correcta (Rose, Daskin, y Koppelman(1988) consultado en Slavin, Lam, y Nanduri (2015).

$$Diferencia\ Relativa = \frac{\sum X_{UE}.c(X_{UE}) - \sum X_{AON}.c(X_{UE})}{\sum X_{UE}.c(X_{UE})} \quad (4.2.1.16)$$

$$cambio\ máximo\ de\ flujo = \max \left( \frac{|x_i^n - x_i^{n-1}|}{x_i^n} \right) \quad (4.2.1.17)$$

Donde:

$x_i^n$ : flujo en el arco  $i$  en la iteración  $n$

#### 4.2.2 Parámetros para la ejecución de la asignación de transporte público del sistema Pumabús

Para la solución del problema en TransCAD, fue necesario crear un sistema de rutas compuesto por las 12 rutas que operan actualmente en CU, especificando su frecuencia (para cada hora de máxima demanda) y la capacidad de los vehículos que conforman la ruta; la capacidad del vehículo para cada ruta se homogenizó como el promedio de la capacidad de los vehículos que actualmente se asignan a cada una de las rutas (ver tabla 4.1).

Adicional a las rutas del Pumabús, se trazaron algunos caminos de a pie, principalmente los que conectan las paradas inmediatamente aledañas, como por ejemplo Economía Sur y Economía Norte, sin embargo, también fue necesario crear caminos de a pie más extensos, tales como entre las estaciones del Metro Ciudad Universitaria y la parada Tienda UNAM, debido a que la ruta 3 no tiene la capacidad para responder a la demanda de viajes que se presenta entre el Metro Ciudad Universitaria y la zona cultural, por lo que se considera que algunos usuarios caminan hasta Tienda UNAM para ahí abordar la ruta 10 o se desplazan hasta llegar a su destino final.

Ruta	Capacidad por vehículo (pasajeros)
Ruta 1	82
Ruta 2	100
Ruta 3	86
Ruta 4	62
Ruta 5	72
Ruta 6	70
Ruta 7	100
Ruta 8	100
Ruta 9	100
Ruta 10	80
Ruta 11	100
Ruta 12	60

*Tabla 4.1– Capacidad de los Vehículos de Cada Ruta*

Los parámetros con los cuales se realizó una primera asignación de transporte público se muestran en la tabla 4.2.

Con el objetivo de que los resultados de la asignación se aproximen más a realidad, se propone una segunda asignación para cada hora de máxima demanda con las ponderaciones establecidas por SEDESOL-MÉXICO para el tiempo viaje realizado en autobús, a pie y para los tiempos de espera (consultadas en Molinero Molinero y Sánchez Arrellano (1997)). Las

ecuaciones utilizadas para la estimación de los diferentes pesos se presentan de la ecuación (4.2.2.1) a la (4.2.2.5).

La ecuación (4.2.2.1) estima el peso del viaje realizado a pie,

$$P_p = 1.5 * (1 + k_r) * k_p \quad (4.2.2.1)$$

La ecuación (4.2.2.2) estima el peso del tiempo de espera de pie

$$P_{ep} = 1.5 * \left(1 + \frac{d_p}{8}\right) * k_l \quad (4.2.2.2)$$

Número de Máximo de Transferencias	2
VOT <sup>13</sup>	1.33
Tarifas	0
Porcentaje de error del tiempo de viaje en vehículo	10%
Porcentaje de error del tiempo de paso entre vehículos	20%
Parámetros de demora al abordar	0.007
Parámetros de demora al descender	0.008
Parámetro de arribo entre llegadas <sup>14</sup>	1
Número de Iteraciones	20000
Criterio de convergencia	0.0001
Máximo tiempo de espera <sup>15</sup>	22 min*
Mínimo tiempo de espera <sup>14</sup>	0 min*
Peso del tiempo de viaje en vehículo	1
Peso del tiempo de penalidad por trasferencia	1
Peso del tiempo de espera	2
Peso del tiempo de permanencia	1
Peso del tiempo de viaje a pie	3
β	4
α	1.5
Distribución del tiempo de viaje en vehículo	Normal
Distribución del tiempo del tiempo de paso entre vehículos	Normal

Tabla 4.2– Parámetros utilizados en la asignación de Transporte público SUE entre las 7 a 8 horas

La ecuación (4.2.2.3) estima el peso del tiempo de espera del usuario sentado

$$P_{es} = k_l \quad (4.2.2.3)$$

<sup>13</sup> Dato proporcionado por GiiTral

<sup>14</sup> debido a que la mayoría de las rutas tienen intervalo de paso que se distribuye normal, ver anexo 1

<sup>15</sup> dato obtenido a partir de una encuesta

La ecuación (4.2.2.4) estima el peso del tiempo de recorrido en vehículo de pie, mientras que la ponderación para el tiempo de recorrido en vehículo sentado está determinada por la ecuación (4.2.2.5).

$$P_{tp} = 1.5 * \left(1 + \frac{d_p}{8}\right) * k_p \quad (4.2.2.4)$$

$$P_{ts} = k_p * k_d \quad (4.2.2.5)$$

Donde  $k_r$  es el coeficiente de gradiente,  $k_p$  coeficiente de tipo de pavimento,  $k_d$  coeficiente de densidad igual a  $1 + (d_s/8)$ ,  $k_i$  coeficiente del lugar de espera,  $d_s$  densidad de usuarios esperando en la parada (usuarios/m<sup>2</sup>) o de asientos (asientos/área ocupada por los asientos) y  $d_p$  densidad de usuarios de pie.

Sin embargo, en TransCAD no se diferencia entre ponderaciones de pie o sentado, por ello se tomó el caso más crítico, es decir, la ponderación para el tiempo de viajes en vehículo de pie y para el tiempo de espera de pie.

El coeficiente de gradiente se lo tomó como cero, dado que CU no presenta mayores variaciones de pendiente.

El coeficiente por tipo de pavimento se obtiene mediante la ecuación (4.2.2.6), tomando un índice de rugosidad de 3, indicado para el pavimento de asfalto cuyas depresiones son apenas visibles, de 10 a 25 mm por cada 3m. Así, la ponderación o peso para el tiempo de viaje a pie es de 1.5375.

$$k_p = 0.95 + \frac{3}{40} = 1.025 \quad (4.2.2.6)$$

El cálculo de la ponderación de espera de pie depende de la comodidad que presenta el lugar donde se espera, denominado  $k_i$ , cuyo valor para un lugar de espera es en una instalación específica (un terminal) es de 0.90, dado que todas las paradas están condicionadas como terminales. La densidad de usuarios esperando en la parada  $d_s$  (usuarios/m<sup>2</sup>) se tomó como 3 usuarios/ m<sup>2</sup>, ya que el área que ocupa una persona en movimiento en contacto con otro usuario es de 0.29 m<sup>2</sup>(Molinero Molinero y Sánchez Arrellano 1997) , dado que las estaciones del Pumabús a pesar de que la hay una importante conglomeración en horas pico, las personas optan por hacer una cola de espera.

$$P_{ep} = 1.5 * \left(1 + \frac{3}{8}\right) * 0.9 = 1.85625$$

Para el cálculo de la ponderación del tiempo de viaje en vehículo de pie, la densidad de usuarios se tomó como 5 usuarios/m<sup>2</sup>, dado que el área aproximada que ocupa una persona contemplando sólo la elipse del cuerpo (es decir sin ningún espacio de holgura) es de 0.18 m<sup>2</sup> (Molinero Molinero y Sánchez Arrellano 1997) y  $k_p = 1.025$  como anteriormente se calculó.

$$P_{tp} = 1.5 * \left(1 + \frac{5}{8}\right) * 1.025 = 2.4984$$

Las ponderaciones restantes se mantuvieron igual a los valores que predetermina TransCAD.

#### 4.2.3 Resultados de la asignación de transporte público estocástico de equilibrio del usuario para viajes realizados entre las 7 y las 8 horas.

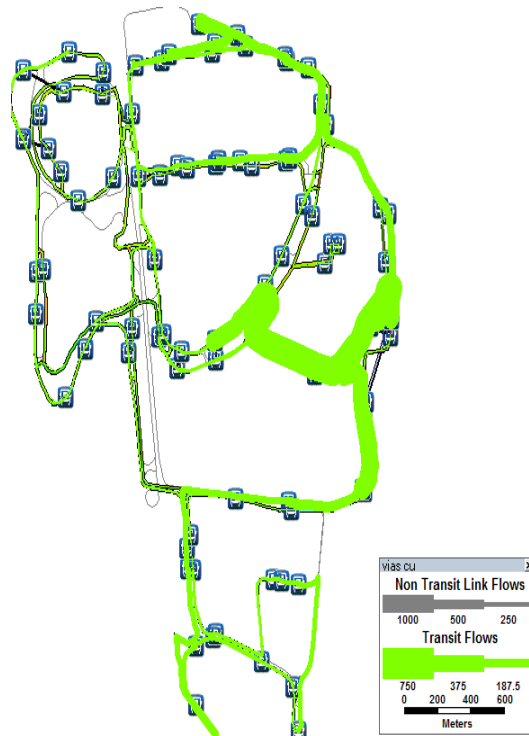
En esta sección se presentan los resultados de dos asignaciones de transporte público para la primera hora de máxima demanda (7-8 horas), la primera se realizó utilizando los parámetros que se muestran en la tabla 4.2, los resultados se presentan de la figura 4.1.1 a la 4.1.18. Posteriormente se presentan los resultados de la segunda asignación (de la figura 4.1.19 a la 4.1.34), en la cual se modificaron las ponderaciones para el tiempo de espera y el tiempo de viaje realizado a pie y en vehículo (obtenidos en la sección 4.2.2) y la comparación entre los resultados de las dos asignaciones.

En la tabla 4.3 se muestran los indicadores de los resultados con la primera asignación, en ella se observa que la convergencia (equilibrio de flujos) se alcanza en la iteración 3675.

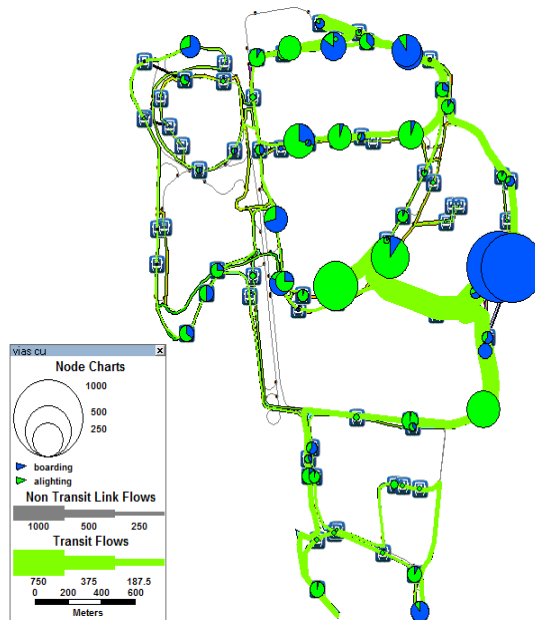
Maximum Iterations	20000
Iterations	3675
Conv. Criteria	0.0001
Relative Gap	0.000001
Max Flow Change	0.1797
Equilibrium reached	Yes

**Tabla 4.3– Indicadores de resultado de la asignación SUE entre las 7 a 8 horas**

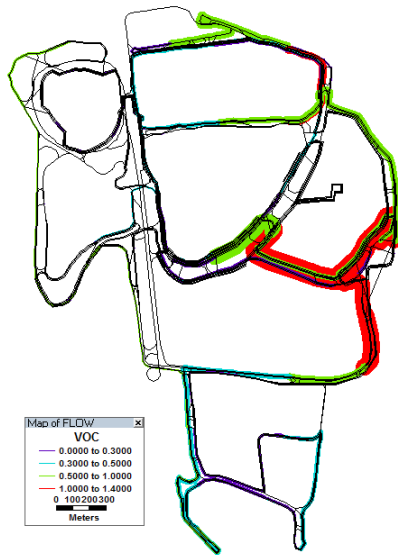
De la figura 4.1.1, se puede concluir que el mayor flujo de viajes se presenta en arcos salientes del metro Ciudad Universitaria y que conectan con paradas como Ciencias Circuito Exterior, Contaduría y Ciencias Políticas, esta situación se corrobora con la figura 4.1.2., donde se evidencia que en las paradas del Metro Ciudad Universitaria abordan gran cantidad de pasajeros y en paradas como Ciencias Circuito Exterior, Contaduría y Ciencias Políticas se muestra que gran cantidad de pasajeros descienden. De igual forma, en la figura 4.1.2 se observa que una cantidad importante de pasajeros abordan los autobuses en paradas ubicadas al norte de CU, hecho que corresponde con la realidad, ya que estas paradas se encuentran aledañas al metro Copilco, que es un gran atractivo de viajes tanto en metro como en colectivo.



**Figura 4.1.1** Asignación de transporte público SUE para viajes realizados entre las 7-8 horas



**Figura 4.1.2** Ascenso y descenso de pasajeros en las paradas del Pumabús- Asignación SUE entre las 7-8 horas



**Figura 4.1.3 Volumen sobre capacidad por intensidad de los arcos de la red del Pumabús- Asignación SUE entre las 7-8 horas**

De la figura 4.1.3., se observa que la mayor congestión (Volumen/Capacidad,  $VOC > 1$ ) se presenta entre las paradas del Metro Ciudad Universitaria y las paradas como Ciencias Circuito Exterior, Contaduría y Ciencias Políticas; y entre las paradas de Odontología y Química, hecho que corresponde con el análisis realizado de las figuras 4.1.1. y 4.1.2. La razón se debe a que son de las facultades con mayor población universitaria y por ejemplo, para el tramo entre Metro CU y Ciencias Políticas sólo la ruta 3 atiende la demanda por lo que se evidencia congestión.

Existe volumen sobre capacidad (VOC) mayor que uno en las rutas 2, 3 y 7 (12 secciones de ruta en total con un VOC máximo de 1,4172 y un mínimo de 1,0716); el tramo con  $VOC > 1$  para la ruta 2 es el que conecta los viajes que se realizan entre la estación del Metro Ciudad Universitaria con la estación de Ciencias-Paradero Circuito Exterior (ver figura 4.1.4), esto se debe a la gran cantidad de viajes que demanda la facultad de ciencias (por la gran población de estudiantes que abarca). Sin embargo, la ruta 4, que también tiene su recorrido por este tramo, presenta  $0.78 < VOC < 0.92$ , esto puede deberse a que la ruta 2 presenta la frecuencia más alta del sistema y por lo tanto es más atractiva.

En el caso de los  $VOC > 1$  de la ruta 3, éstos se presentan en el tramo que comunica el metro Ciudad Universitaria con la parada Ciencias Políticas (ver figura 4.1.5), como ya se mencionó anteriormente esto es debido a la alta población de la facultad y que sólo la ruta 3 atiende este tramo.

Los tramos con  $VOC > 1$  de la ruta 7, conectan las paradas de Odontología con la parada de Química (ver figura 4.1.6). Su saturación de igual forma se debe a que se concentra gran

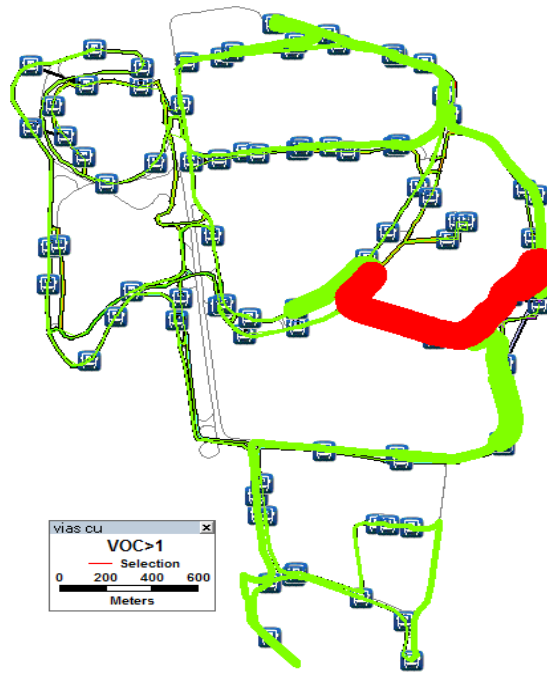


población universitaria entre estos tramos, como la población de la facultad de Medicina y que sólo la ruta 7 cubre en su totalidad el tramo Odontología-Química.

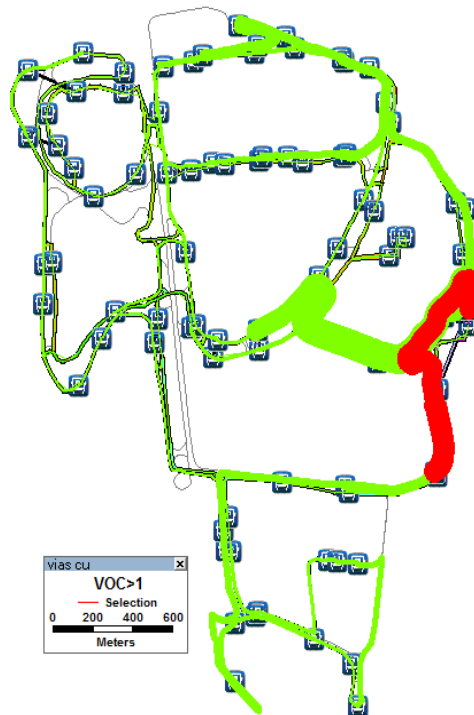
A modo de prueba, se agregó un vehículo más para las rutas 2, 3 y 7. En los resultados de la asignación se evidenció que los arcos con  $VOC > 1$  se redujeron a 6, con 1.1831 y 1.1084 como VOC máximo y mínimo respectivamente. Sin embargo, es importante evaluar el estado de las otras rutas para identificar posibles desequilibrios en materia de diseño de rutas o sobreasignación de vehículos a otras rutas.

De lo anterior, la importancia de analizar las rutas que presentan tramos con  $VOC < 0.5$ , puesto que se considera que en una hora de máxima demanda este tipo de tramos representan recursos ociosos que pueden ser aprovechados por tramos con problemas de capacidad. De la tabla 4.4 y las figuras de la 4.1.7 a la 4.1.18, se puede observar que las rutas 6, 10, 11 y 12 se conforman en su gran mayoría por tramos con  $VOC < 0.5$ . Además, se puede observar que los tramos con  $VOC < 0.5$  de algunas rutas se traslapan, como ejemplo se puede observar los tramos de la zona del Estadio Olímpico de las rutas 6, 8 y 11, o los tramos de las rutas 6 y 8 sobre el circuito escolar que conectan las paradas: Servicios Médicos, Alberca Olímpica, Ingeniería Sur, Frontones e IIMAS o sobre el circuito exterior que recorre desde la parada Invernadero hasta la parada Metrobús CU oriente.

El pretender redistribuir el número de vehículos por ruta, no es posible puesto que el servicio en estas rutas con bajo volumen (rutas 6, 10, 11 y 12) generalmente se ofrece con tan sólo un vehículo por ruta. Ante esto una alternativa es replantear el recorrido de las rutas existentes buscando que los tramos de cada ruta tengan un VOC superior a 0.8 y menor a 1, como por ejemplo, dado que las rutas 6 y 8 son similares y su VOC es bajo, se puede evaluar el efecto sobre el sistema que tendría el hecho de unificar estas rutas y prestar su servicio con tan sólo un vehículo y asignar el vehículo sobrante a una ruta con  $VOC > 1$ , como la ruta 3. Sin embargo, existen varias alternativas como ésta, el encontrar la “mejor” o el conjunto de cambios que optimice el servicio se convierte en un problema de optimización combinatorio que está fuera del alcance de este trabajo sin embargo se cree necesario.



**Figura 4.1.4** Volumen sobre capacidad mayor a uno de los arcos de la Ruta 2- Asignación SUE entre las 7-8 horas



**Figura 4.1.5** Volumen sobre capacidad mayor a uno de los arcos de la Ruta 3- Asignación SUE entre las 7-8 horas

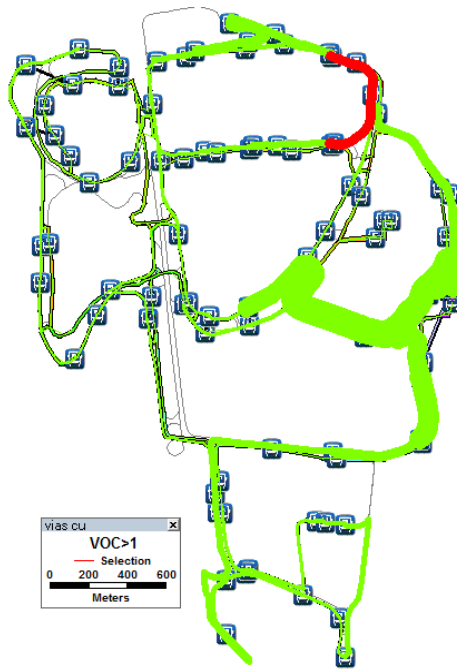


Figura 4.1.6 Volumen sobre capacidad mayor a uno de los arcos de la Ruta 7- Asignación SUE entre las 7-8 horas

Ruta	Número de Tramos con VOC<0.5	Mínimo VOC	Máximo VOC
Ruta 1	12	0,0381	0,4095
Ruta 2	7	0,0536	0,1814
Ruta 3	20	0,0653	0,4568
Ruta 4	11	0,0527	0,3629
Ruta 5	14	0,0018	0,3777
Ruta 6	28	0,0058	0,3474
Ruta 7	13	0,0238	0,4873
Ruta 8	20	0,0226	0,1392
Ruta 9	15	0,2032	0,4144
Ruta 10	23	0,0663	0,4987
Ruta 11	8	0,1617	0,3502
Ruta 12	14	0,0325	0,3234
<b>Total</b>	<b>185</b>		

Tabla 4.4– Número de tramos con VOC<0.5 como resultado de la asignación SUE entre las 7 a 8 horas



Figura 4.1.7 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 1- Asignación SUE entre las 7-8 horas

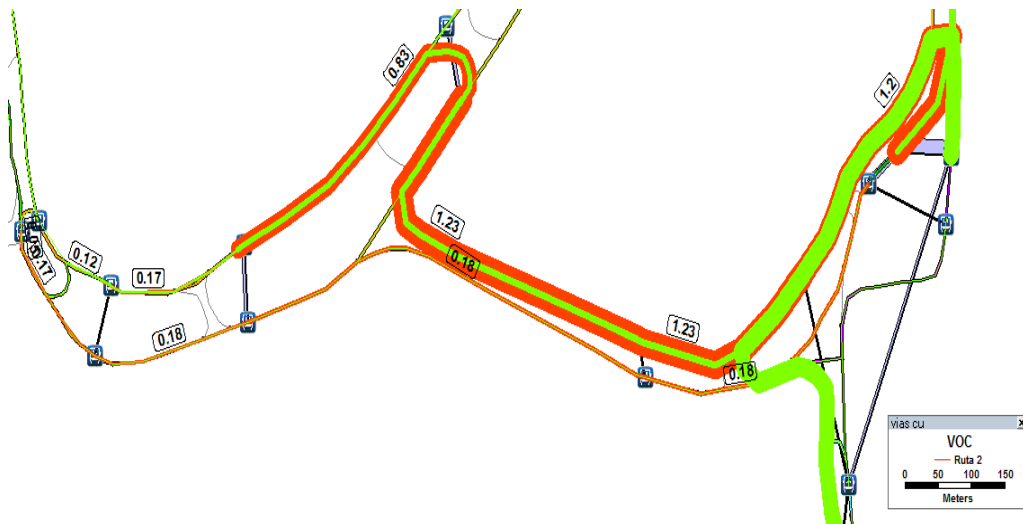


Figura 4.1.8 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 2- Asignación SUE entre las 7-8 horas

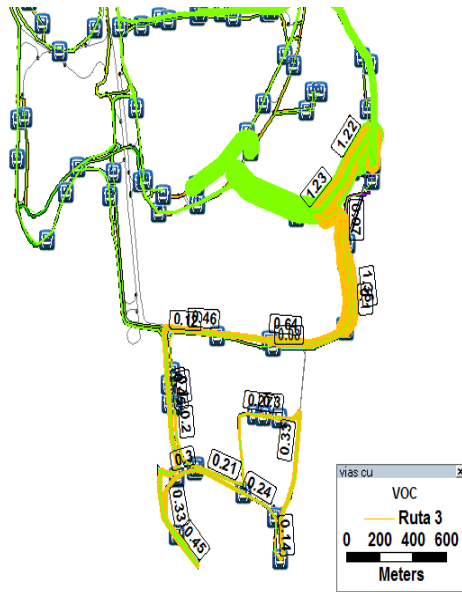


Figura 4.1.9 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 3- Asignación SUE entre las 7-8 horas



Figura 4.1.10 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 4- Asignación SUE entre las 7-8 horas

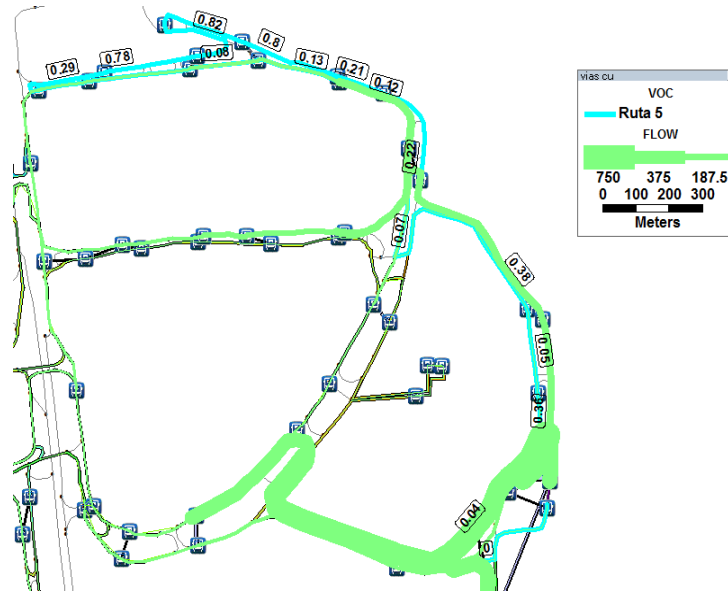


Figura 4.1.11 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 5- Asignación SUE entre las 7-8 horas

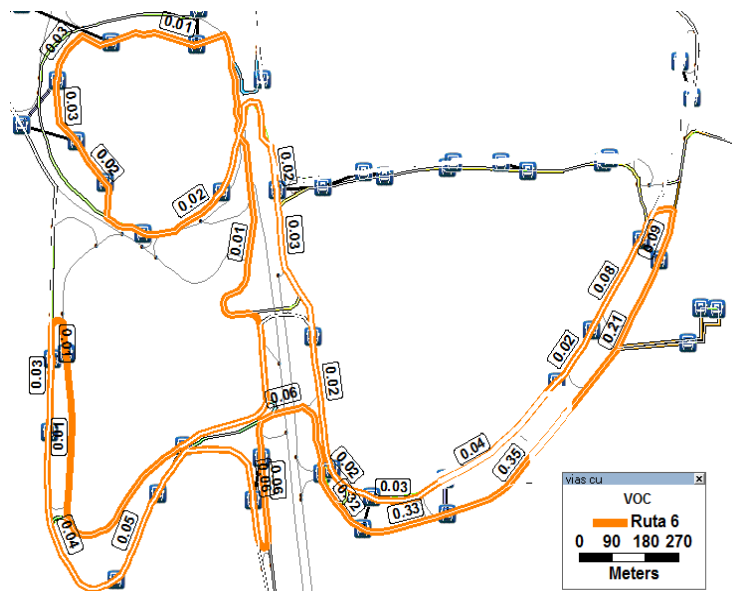


Figura 4.1.12 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 6- Asignación SUE entre las 7-8 horas



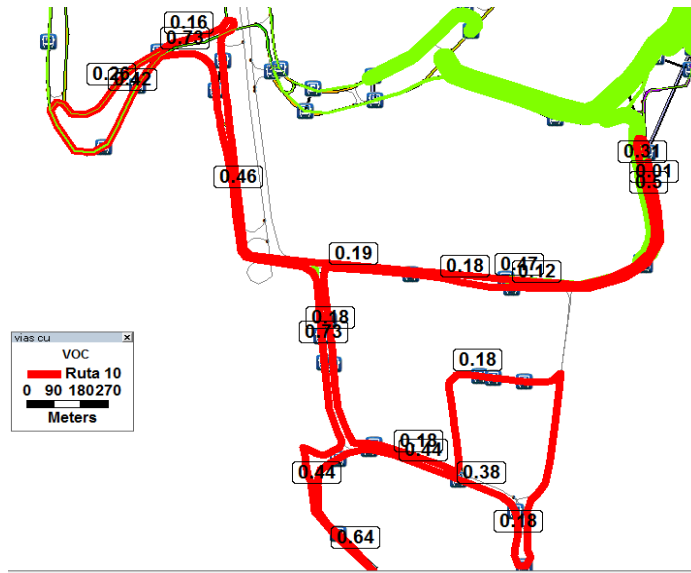


Figura 4.1.16 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 10- Asignación SUE entre las 7-8 horas

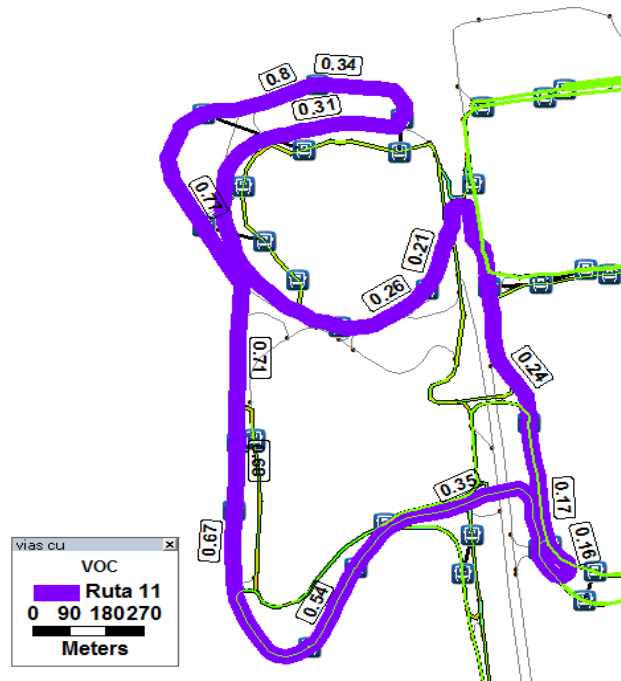
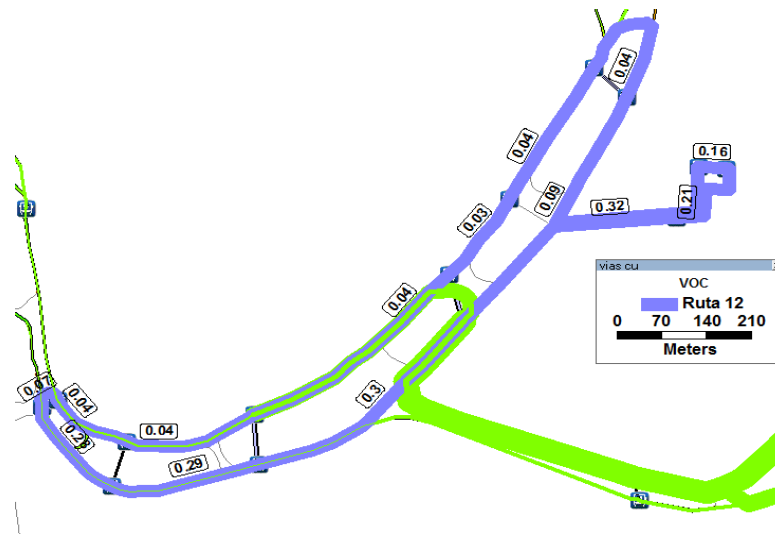


Figura 4.1.17 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 11- Asignación SUE entre las 7-8 horas





**Figura 4.1.18** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 12- Asignación SUE entre las 7-8 horas

En la tabla 4.5 se presentan los indicadores de los resultados obtenidos mediante una segunda asignación, la cual fue realizada con las ponderaciones obtenidas mediante lineamientos de SEDESOL (en la sección 4.2.2), en ella se observa que el número de iteraciones en el cual se alcanzó el equilibrio disminuye drásticamente (de 3675 a 25), por el contrario se muestra el máximo flujo cambiado de iteración a iteración incremento considerablemente (de 0.1797 a 24.8949) y “la diferencia relativa” se incrementó levemente por lo que aún se considera una buena solución, sin embargo, los nuevos resultados de la asignación muestran que ya no existe congestión en el tramo Metro Ciudad Universitaria Oriente- Tienda UNAM (ver figura 4.1.19) y se observa un ligero incremento en el número de usuarios que abordan en la parada Tienda UNAM (ver figura 4.1.22). Lo anterior implica que los usuarios prefieren caminar hasta la parada Tienda UNAM para ahí abordar la ruta 10, debido a la saturación que sufre la ruta 3 en el tramo mencionado, esto se debe a que las nuevas ponderaciones sugieren que para los usuarios es preferible caminar a hacer los recorridos en vehículos.

En esta nueva asignación las rutas que presentan tramos con  $VOC > 1$  son las rutas 2, 3, 4 y 7, a diferencia de la primera asignación que tan sólo eran las rutas 2, 3 y 7; la ruta 4 incrementó su VOC justo en la parada Química Conjunto D y E, esto puede deberse a que dado que los usuarios están más “dispuestos” a caminar, se desplazan hasta dicha estación con la esperanza de que algunos usuarios desciendan en esta parada y ellos poder abordar.

Aunque esta nueva asignación parece estar más acorde a la realidad, aun se observa de las figuras (4.1.23) a la (4.1.34) y de la tabla 4.6 que el número de tramos con  $VOC < 0.5$  sigue siendo significativo por lo que el análisis descrito para la primera asignación realizada es válido también para esta asignación.

Maximum Iterations	20000
Iterations	25
Conv. Criteria	0.0001
Relative Gap	0.000069
Max Flow Change	24.8949
Equilibrium reached	Yes

Tabla 4.5– Indicadores de resultado de la asignación SUE entre las 7 a 8 horas con cambio en las ponderaciones

Ruta	Número de Tramos con VOC<0.5	Mínimo VOC	Máximo VOC
Ruta 1	12	0,0363	0,4077
Ruta 2	7	0,0431	0,1946
Ruta 3	21	0,0577	0,4500
Ruta 4	11	0,0537	0,3445
Ruta 5	14	0,0005	0,3548
Ruta 6	28	0,0000	0,3481
Ruta 7	12	0,0116	0,4991
Ruta 8	20	0,0029	0,1364
Ruta 9	15	0,1694	0,4179
Ruta 10	20	0,0000	0,4712
Ruta 11	8	0,1617	0,4058
Ruta 12	14	0,0187	0,2896
Total	182		

Tabla 4.6– Número de tramos con VOC<0.5 como resultado de la asignación SUE entre las 7 a 9 horas con cambio en ponderaciones

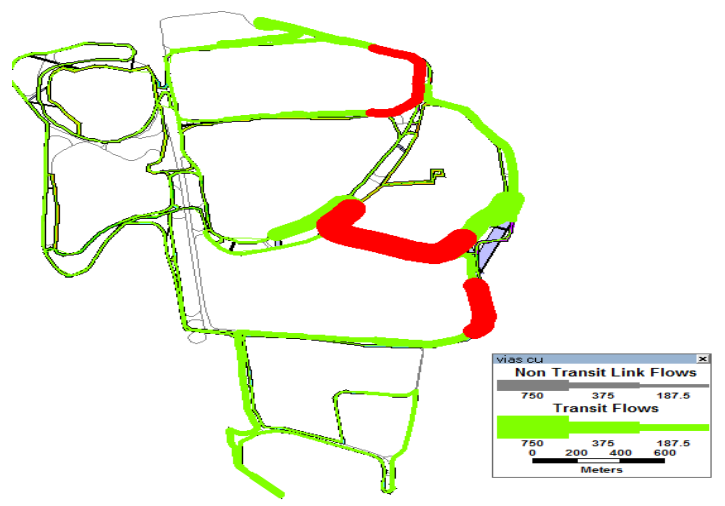
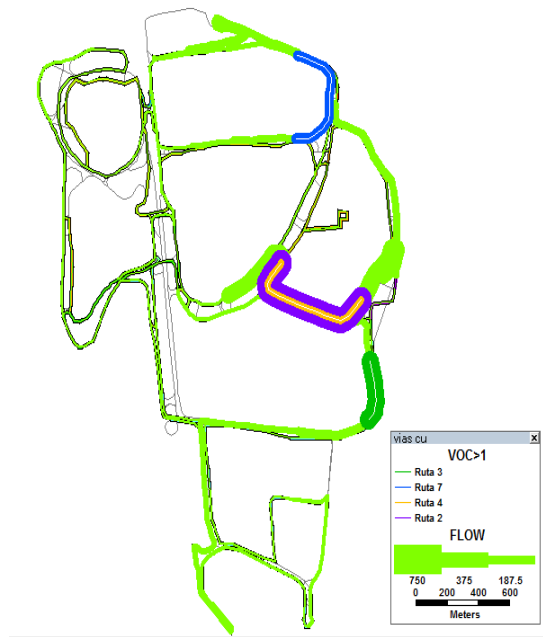
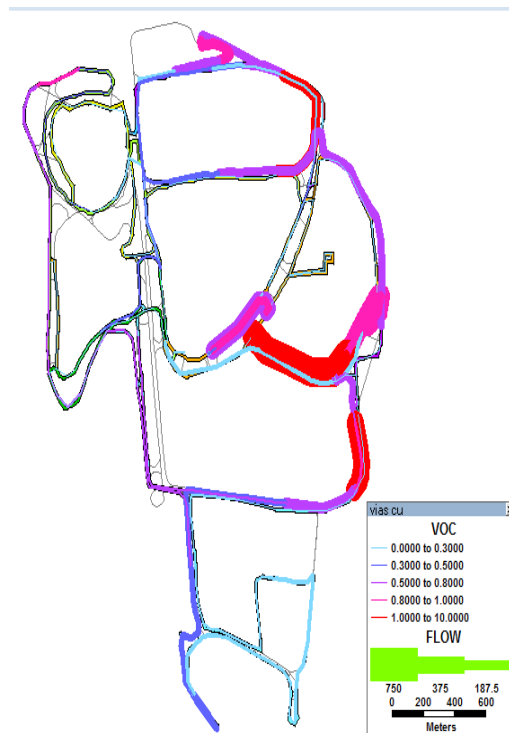


Figura 4.1.19 Volumen sobre capacidad mayor a 1 de los arcos de la Red del Pumbús - Asignación SUE entre las 7-8 horas con cambio en Ponderaciones



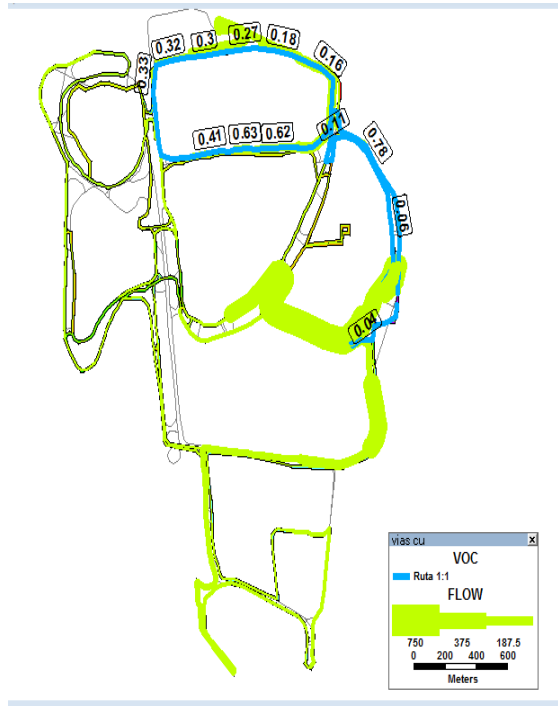
**Figura 4.1.20** Volumen sobre capacidad mayor a 1 de los arcos por rutas - Asignación SUE entre las 7-8 horas con cambio en ponderaciones



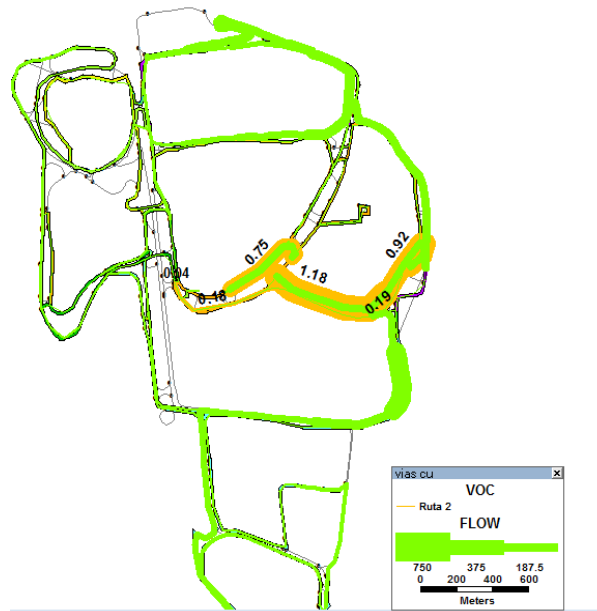
**Figura 4.1.21** Volumen sobre capacidad de los arcos por Intensidad - Asignación SUE entre las 7-8 horas con cambio en Ponderaciones



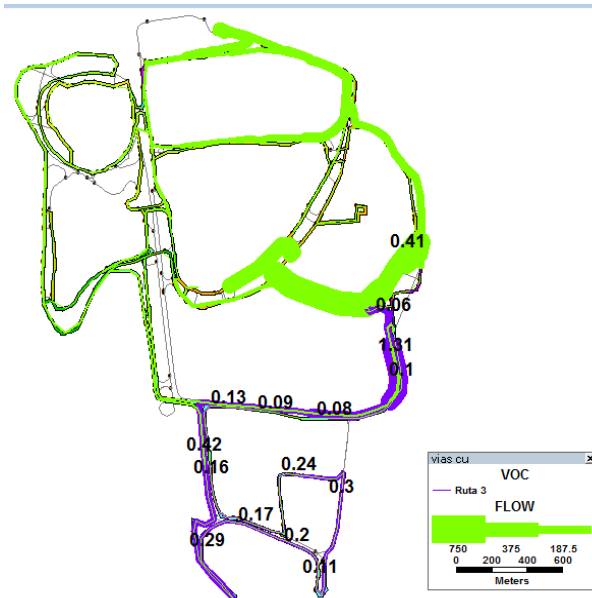
**Figura 4.1.22** Ascenso y descenso de pasajeros en las paradas del Pumabús - Asignación SUE entre las 7-8 horas con cambio en Ponderaciones



**Figura 4.1.23** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 1 - Asignación SUE entre las 7-8 horas con cambio en ponderaciones



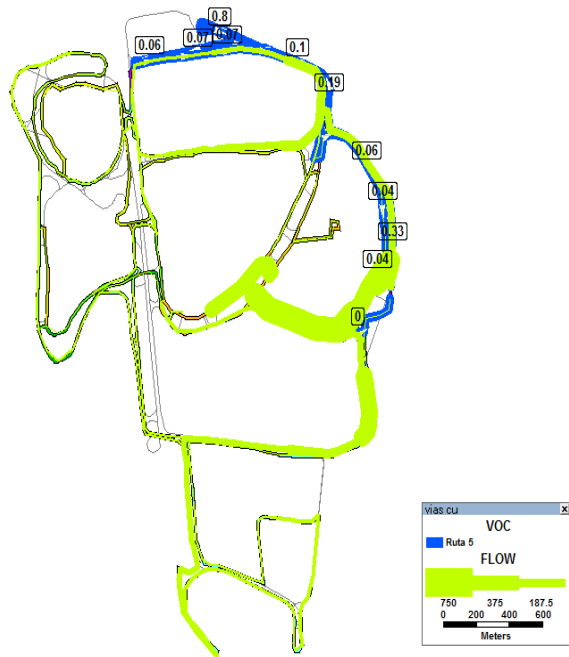
**Figura 4.1.24** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 2 - Asignación SUE entre las 7-8 horas con cambio en ponderaciones



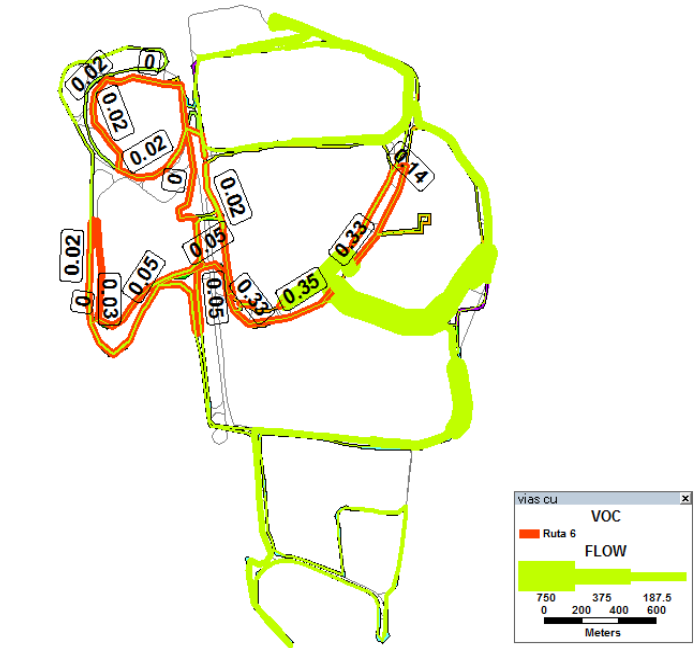
**Figura 4.1.25** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 3 - Asignación SUE entre las 7-8 horas con cambio en ponderaciones



**Figura 4.1.26** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 4- Asignación SUE entre las 7-8 horas con cambio en ponderaciones



**Figura 4.1.27** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 5 - Asignación SUE entre las 7-8 horas con cambio en ponderaciones



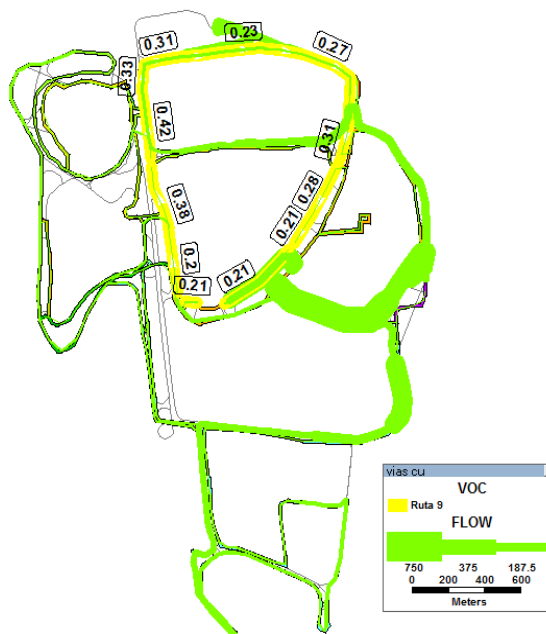
**Figura 4.1.28** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 6 - Asignación SUE entre las 7-8 horas con cambio en ponderaciones



**Figura 4.1.29** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 7 - Asignación SUE entre las 7-8 horas con cambio en ponderaciones



**Figura 4.1.30** Volumen sobre Capacidad de los arcos de la Ruta 8 - Asignación SUE entre las 7-8 horas con cambio en ponderaciones

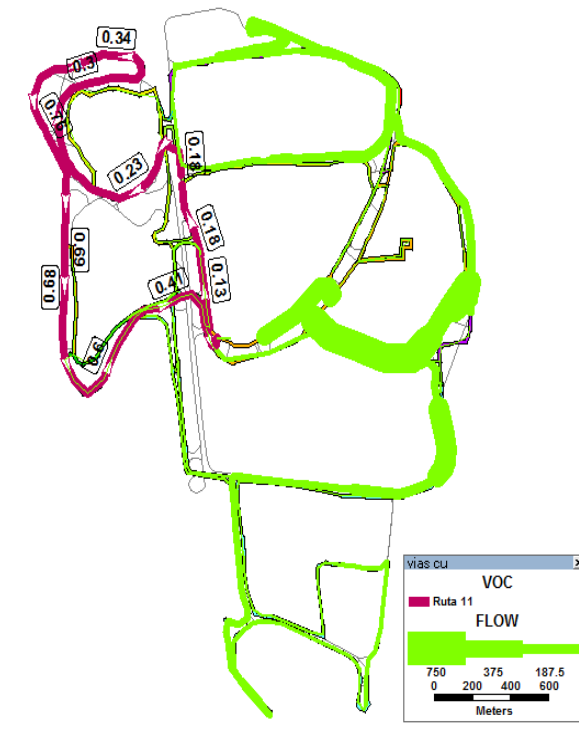


**Figura 4.1.31** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 9 - Asignación SUE entre las 7-8 horas con cambio en ponderaciones





**Figura 4.1.32** Volumen sobre Capacidad de los arcos de la Ruta 10 - Asignación SUE entre las 7-8 horas con cambio en ponderaciones



**Figura 4.1.33** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 11 - Asignación SUE entre las 7-8 horas con cambio en ponderaciones



*Figura 4.1.34 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 12 - Asignación SUE entre las 7-8 horas con cambio en ponderaciones*

#### 4.2.4 Resultados de la asignación de transporte público estocástico de equilibrio del usuario para viajes realizados entre las 15 y las 16 horas

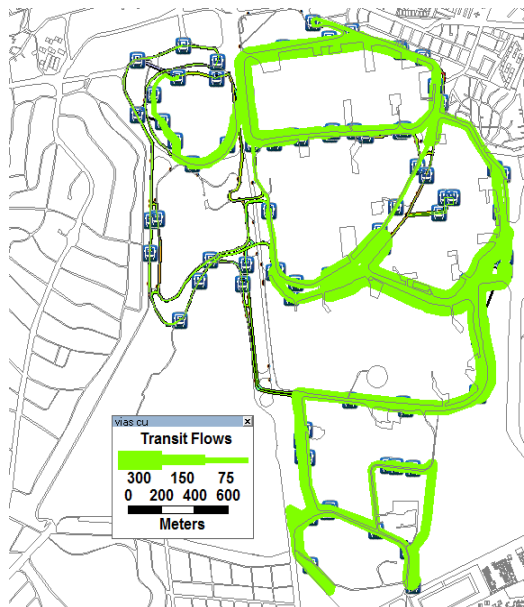
En esta sección se presentan los resultados de la asignación de transporte público para la segunda hora de máxima demanda (15-16 horas) utilizando los parámetros que se muestran en la tabla 4.2 (de la figura 4.2.1 a la 4.2.17). Posteriormente se presentan los resultados de una segunda asignación (de la figura 4.2.18 a la 4.2.34), en la cual se modificaron las ponderaciones para tiempo de espera y tiempo de viaje realizado a pie y en vehículo (obtenidos en la sección 4.2.2) y su respectiva comparación.

En la tabla 4.7, se muestra los indicadores de los resultados obtenidos con la primera asignación (ponderaciones de la tabla 4.2), en ella se observa que la convergencia (equilibrio de flujos) se alcanza en la iteración 119.

Maximum Iterations	20000
Iterations	119
Conv. Criteria	0.0001
Relative Gap	0.000026
Max Flow Change	0.6239
Equilibrium reached	Yes

*Tabla 4.7– Indicadores de resultado de la Asignación SUE entre las 15 a 16 horas*

De las figuras 4.2.1. y 4.2.3, se observa que los mayores flujos se ubican entre las paradas Metro CU Poniente, Ciencias Paradero Circuito Exterior, Contaduría y Trabajo Social; otro tramo de gran flujo se presenta entre las parada de Cómputo Académico, Ciencias por Circuito de la Investigación Sur y Metro CU Poniente (tramo en sentido contrario al descrito anteriormente); entre la paradas TV UNAM y la parada Metro Oeste (sobre la ruta 3) como producto de los viajes que se generan en la parte sur de CU y se dirigen a la Estación Metro Universidad y se observa que en esta hora de máxima demanda el flujo entre la parte norte de CU y los estacionamientos del Estadio Olímpico ha incrementado significativamente, esto debido a que los usuarios se trasladan de alguna de las facultades ubicadas en la zona sur hacia los estacionamiento del Estadio Olímpico, para abordar su vehículo particular e iniciar su viaje por fuera de CU. Estos mismos flujos (en 11 arcos) presentan volumen sobre capacidad mayor a 1, es decir, en estos tramos existe congestión, debido a que el flujo de pasajeros rebasa la capacidad de las líneas (ver figura 4.2.3). Sin embargo, la congestión no es significativa, debido a que el mayor VOC que se presenta es de 1.2854 y un mínimo de 1.0363 (en comparación a la HMD 1 con un máximo de 1,4172 y un mínimo de 1,0716). A diferencia de la HMD1, en la figura 4.2.2 se observa que ahora las facultades ubicadas en la parte sur de CU juegan un papel más activo en la generación de viajes, esto debido a que es una hora en la que gran parte de la población universitaria finaliza sus actividades. No obstante, el análisis de tramos con  $VOC < 0.5$  (figuras 4.2.5 a 4.2.17 y tabla 4.8) corroboran la necesidad de replantear las rutas existentes planteado en la sección 4.2.3.



**Figura 4.2.1** Asignación de transporte público SUE para viajes realizados entre las 15-16 horas



Figura 4.2.2 Ascenso y descenso de pasajeros en las paradas del Pumabús- Asignación SUE entre las 15-16 horas

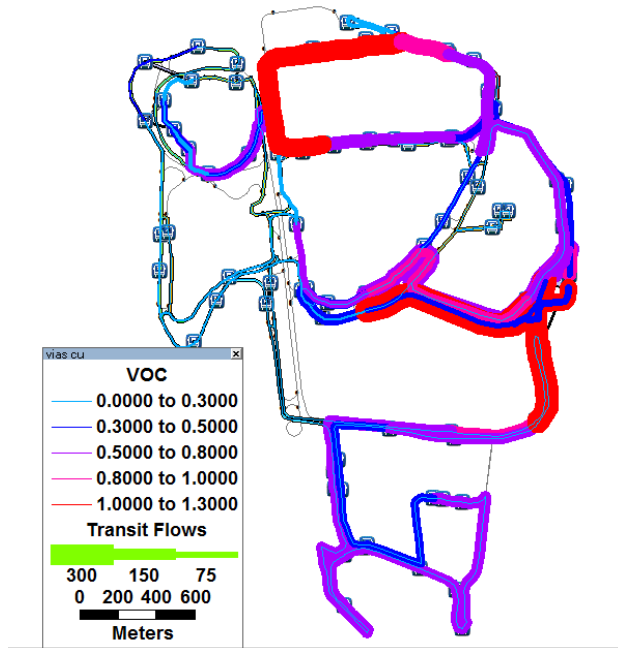


Figura 4.2.3 Volumen sobre capacidad de los arcos de la red del Pumabús- Asignación SUE entre las 15-16 horas

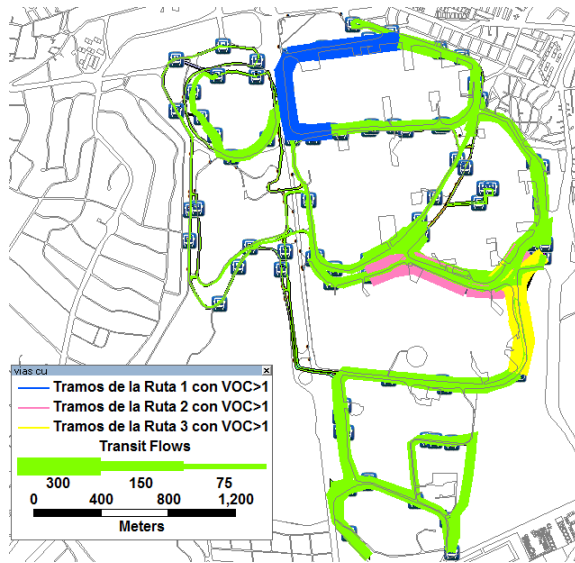


Figura 4.2.4 Volumen sobre capacidad mayor a uno de los arcos por ruta - Asignación SUE entre las 15-16 horas

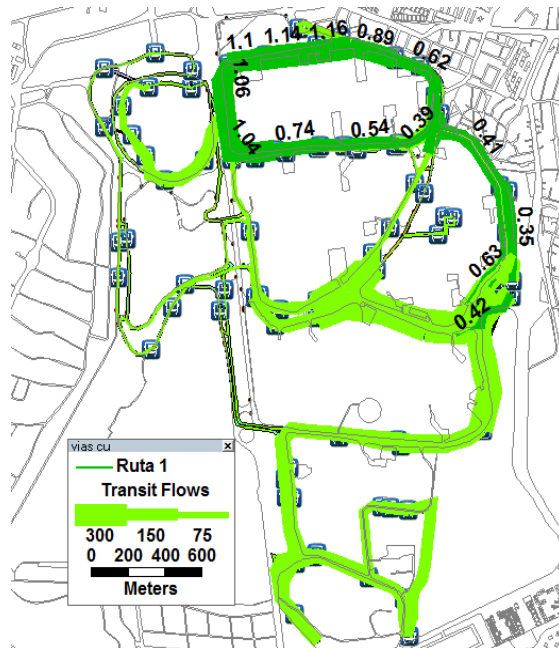


Figura 4.2.5 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 1- Asignación SUE entre las 15-16 horas

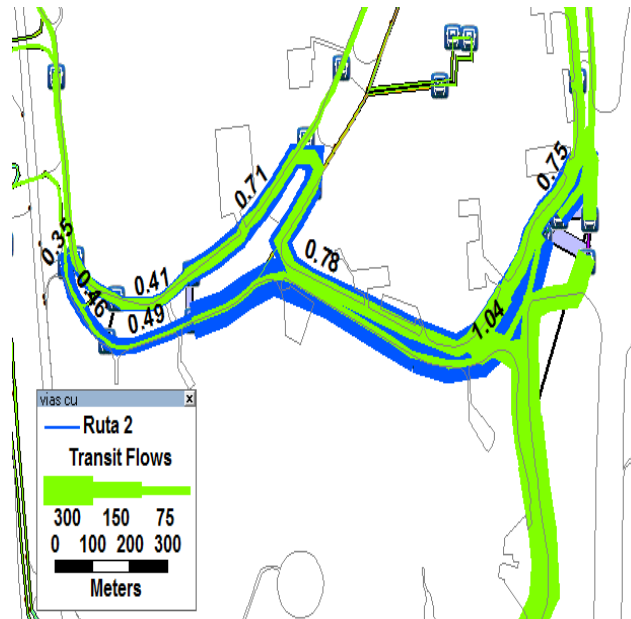


Figura 4.2.6 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 2- Asignación SUE entre las 15-16 horas

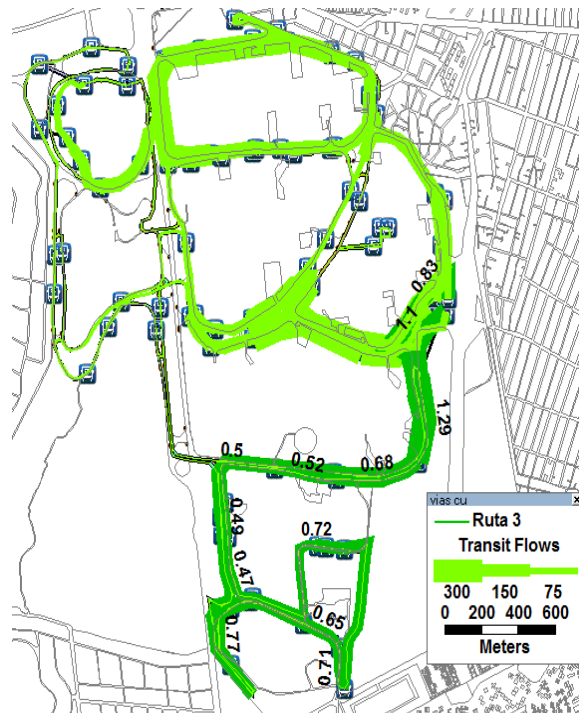


Figura 4.2.7 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 3- Asignación SUE entre las 15-16 horas

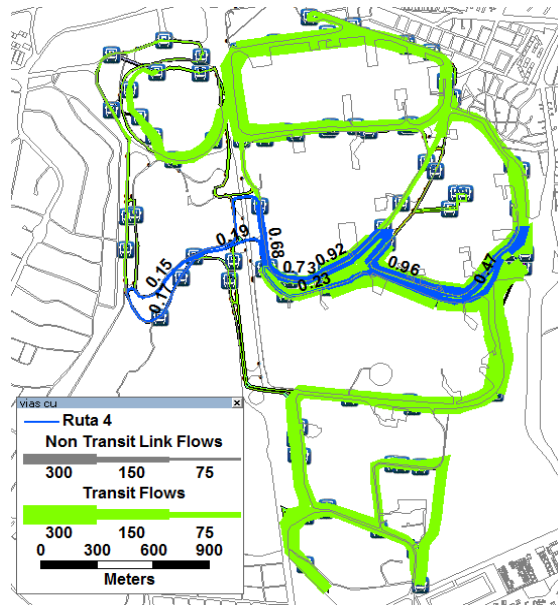


Figura 4.2.8 Volumen obre capacidad de los arcos de la Ruta 4- Asignación SUE entre las 15-16 horas

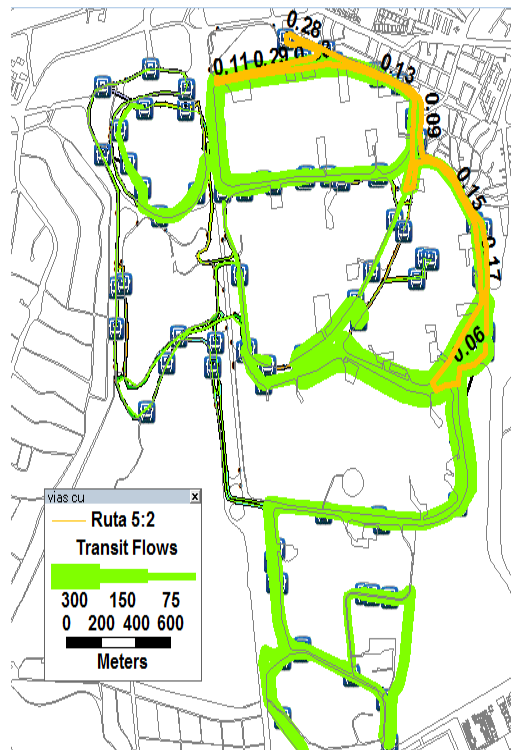


Figura 4.2.9 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 5- Asignación SUE entre las 15-16 horas

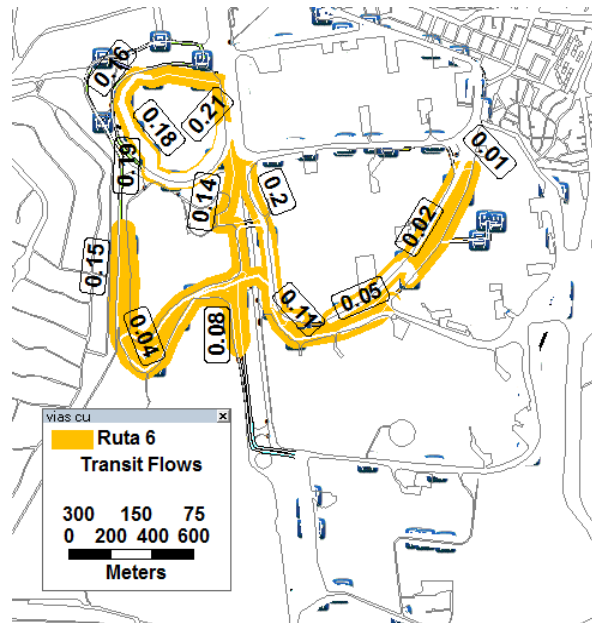


Figura 4.2.10 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 6- Asignación SUE entre las 15-16 horas

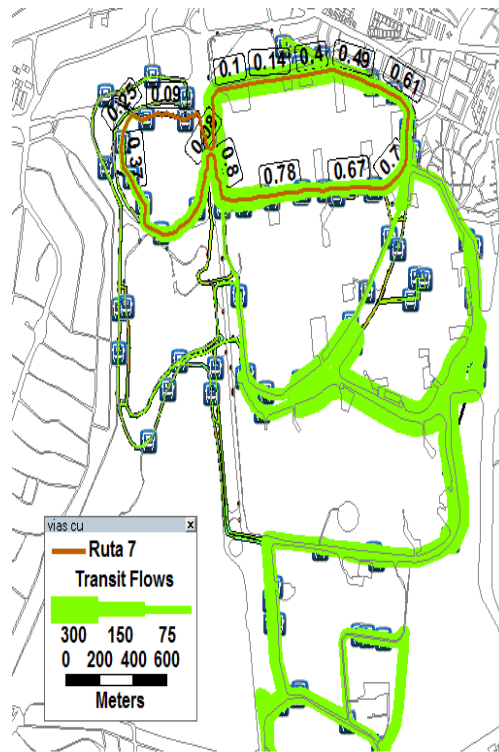


Figura 4.2.11 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 7- Asignación SUE entre las 15-16 horas



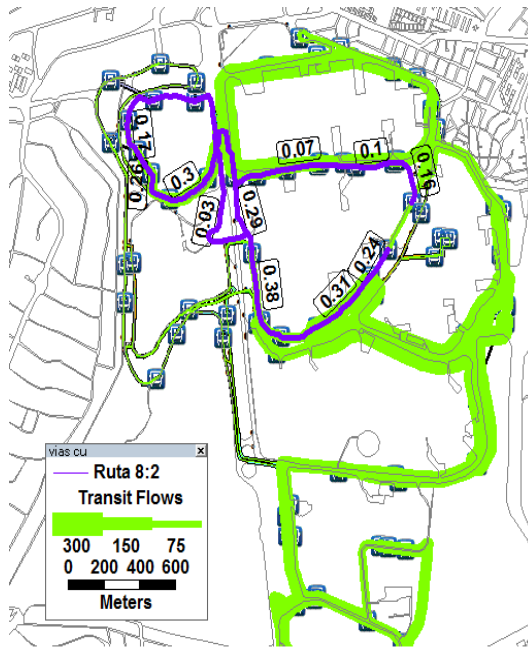


Figura 4.2.12 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 8- Asignación SUE entre las 15-16 horas

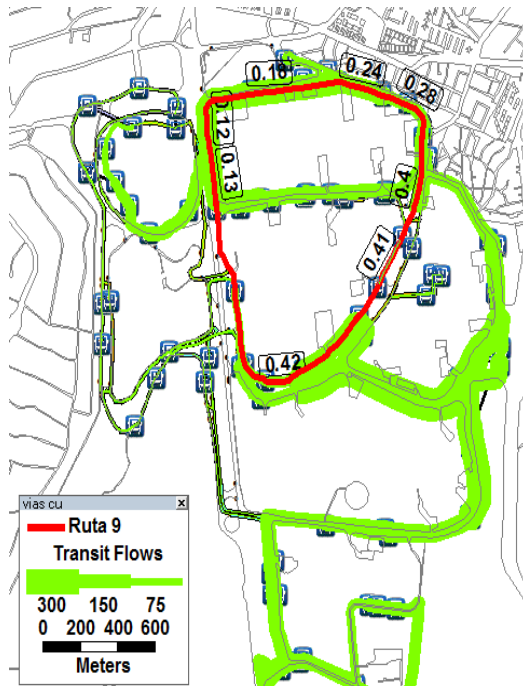


Figura 4.2.13 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 9- Asignación SUE entre las 15-16 horas

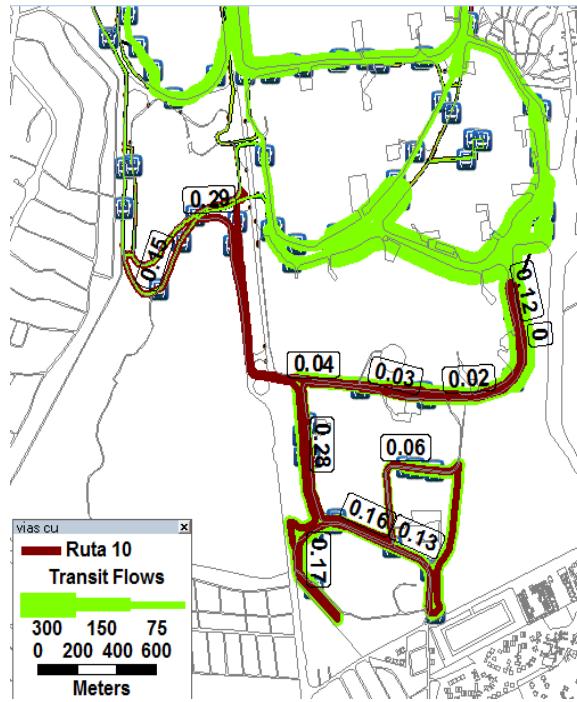


Figura 4.2.14 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 10- Asignación SUE entre las 15-16 horas

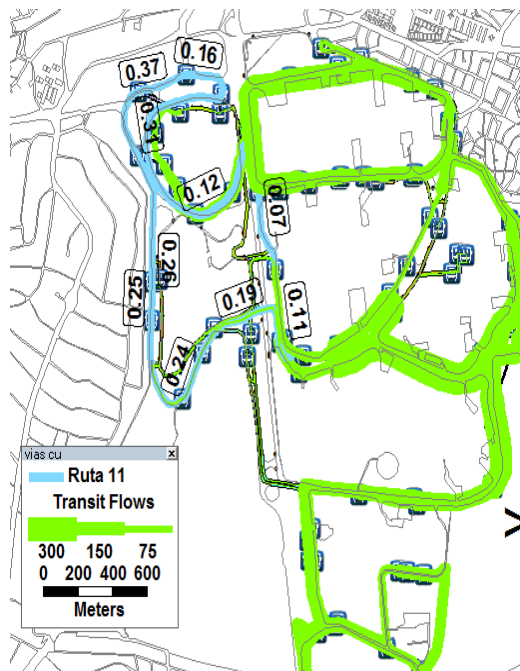


Figura 4.2.15 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 11- Asignación SUE entre las 15-16 horas

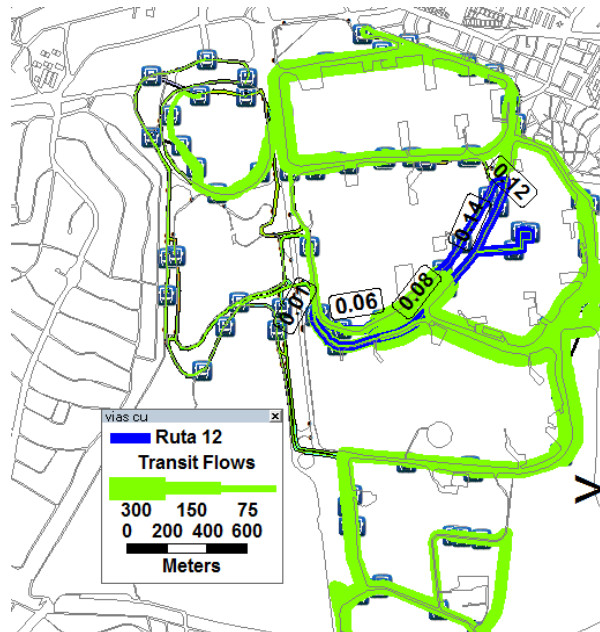


Figura 4.2.16 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 12- Asignación SUE entre las 15-16 horas

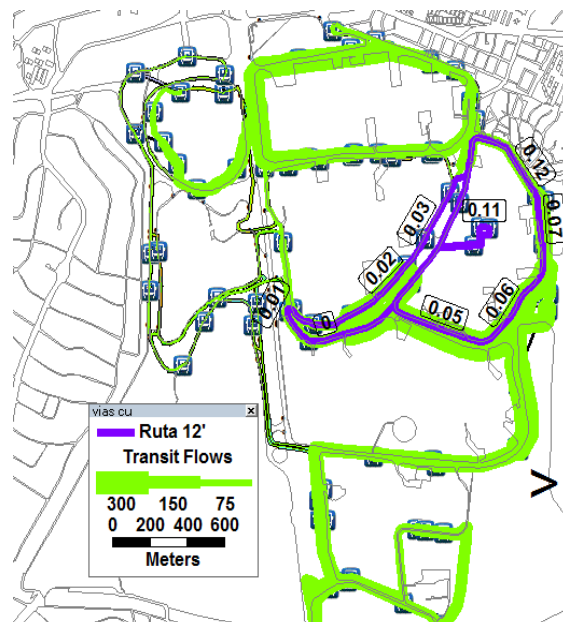


Figura 4.2.17 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 12'- Asignación SUE entre las 15-16 horas

uta	Número de Tramos con VOC<0.5	Mínimo VOC	Máximo VOC
Ruta 1	4	0,0312	0,4232
Ruta 2	5	0,3480	0,4921
Ruta 3	4	0,4655	0,4957
Ruta 4	8	0,1515	0,4700
Ruta 5	18	0,0514	0,3575
Ruta 6	28	0,0149	0,2147
Ruta 7	9	0,0810	0,4884
Ruta 8	20	0,0283	0,3780
Ruta 9	15	0,1218	0,4210
Ruta 10	27	0,0020	0,2856
Ruta 11	14	0,0725	0,3670
Ruta 12	14	0,0071	0,1451
Ruta 12'	20	0.0049	0.1329
<b>TOTAL</b>	186		

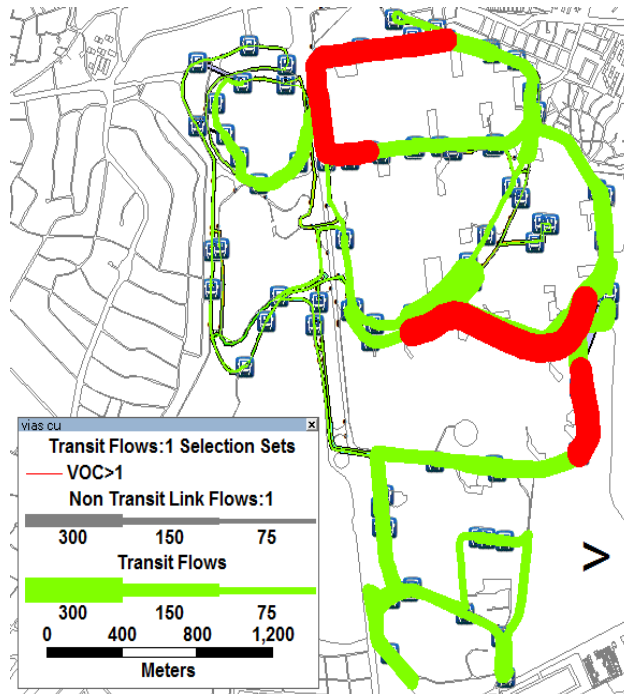
Tabla 4.8– Número de Tramos con VOC<0.5 como resultado de la asignación SUE entre las 15 a 16 horas

En la tabla 4.9 se muestran los indicadores de resultados de la asignación con los valores de las ponderaciones obtenidos mediante criterios de SEDESOL de la sección 4.2.2, en los cuales a comparación de los indicadores obtenidos con ponderaciones preestablecidas en TransCAD (ver tabla 4.2), el número de iteraciones necesarias para alcanzar el equilibrio se incrementó en tres unidades, el incremento en el “la diferencia relativa” es despreciable y el máximo flujo modificado de iteración a iteración incremento en aproximadamente 0.5, por lo anterior se puede concluir que los resultados son aceptables.

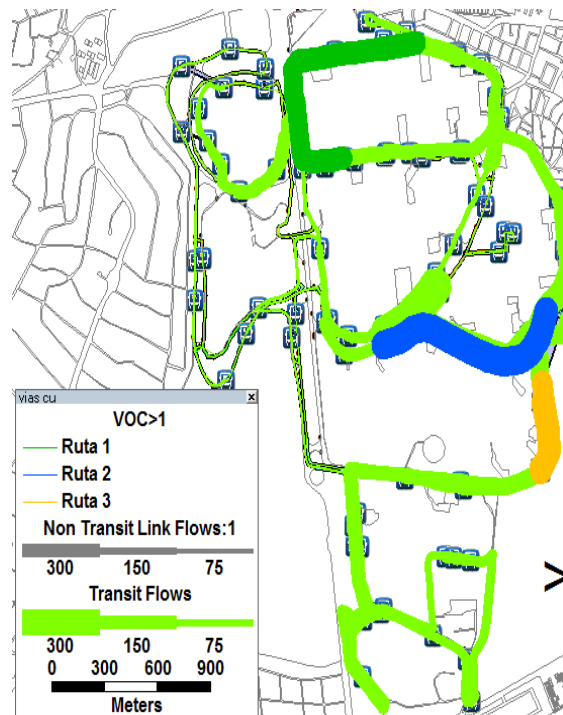
Los resultados de la nueva asignación muestran que con el cambio de ponderaciones se disminuye el número de tramos con VOC> 1 a 9 (ver figura 4.2.18), el número de tramos con VOC <0.5 tan sólo disminuye en una unidad (ver tabla 4.10) y al observar las figuras (4.2.21) a (4.2.34) los VOC de cada una de las rutas no muestran cambios considerables con respecto a la asignación realizada con los parámetros de la tabla 4.2 para esta hora de máxima demanda. Sin embargo, se observa nuevamente desbalance de cargas en las rutas que corroboran la necesidad de un rediseño.

Maximum Iterations	20000
Iterations	222
Conv. Criteria	0.0001
Relative Gap	0.000094
Max Flow Change	1.0947
Equilibrium reached	Yes
VOC>1	9

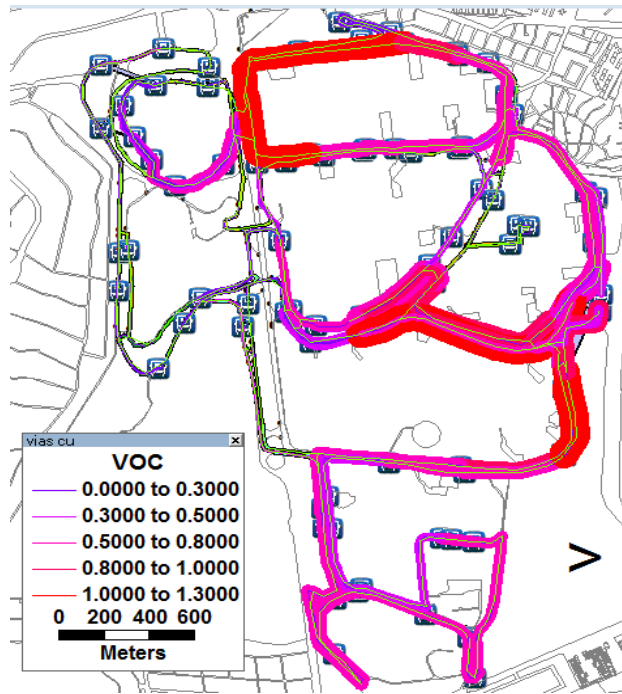
Tabla 4.9– Indicadores de resultado de la asignación SUE entre las 15 a 16 horas con cambio en las ponderaciones



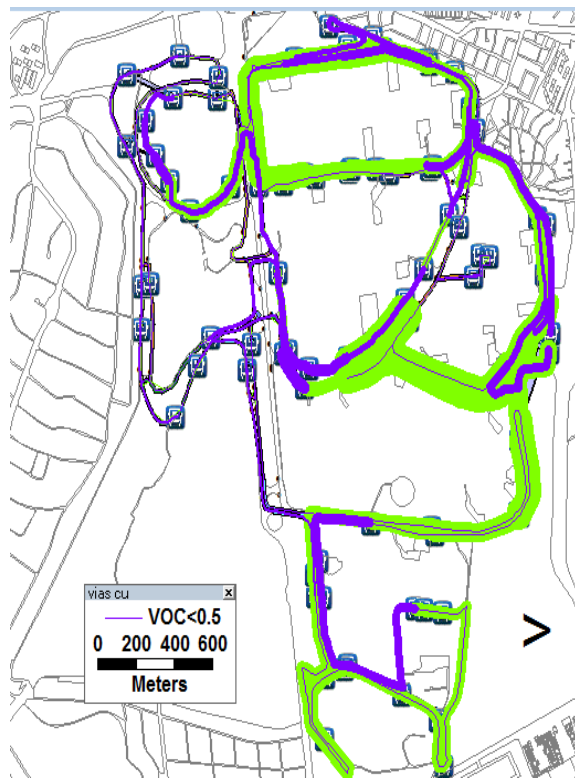
**Figura 4.2.18 Volumen sobre capacidad mayor a uno de los arcos de la red del Pumbús- Asignación SUE entre las 15-16 horas con cambio en ponderaciones**



**Figura 4.2.19 Volumen sobre capacidad mayor a uno por rutas - Asignación SUE entre las 15-16 horas con cambio en ponderaciones**



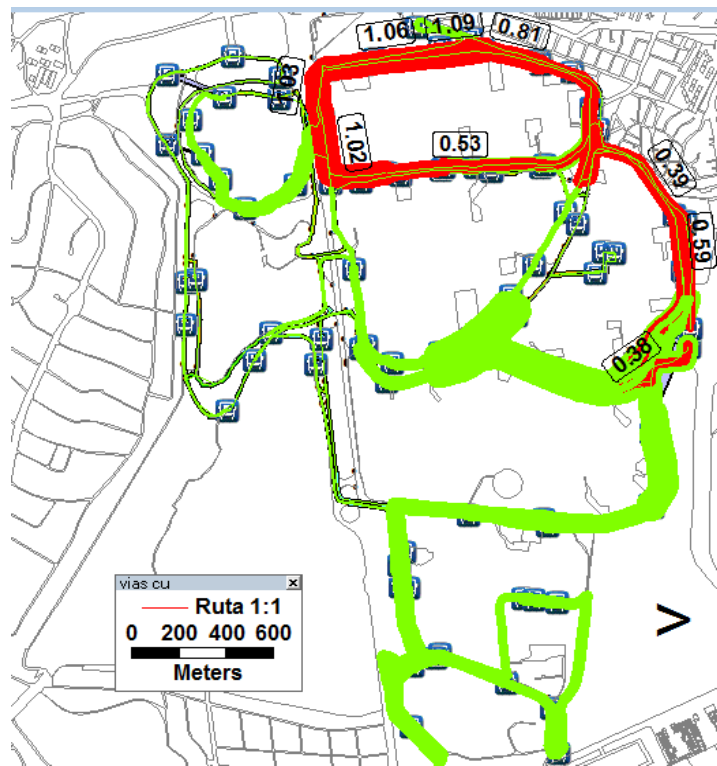
**Figura 4.2.20** Volumen sobre capacidad por intensidad de los arcos de la Red del Pumabús- Asignación SUE entre las 15-16 horas con cambio en ponderaciones



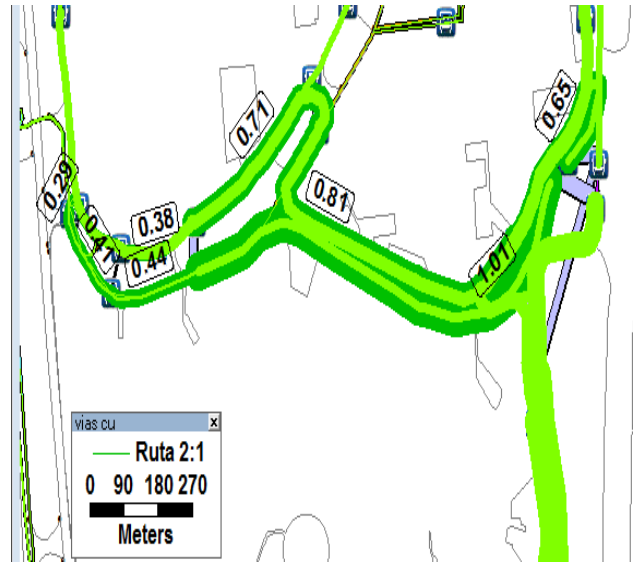
**Figura 4.2.21** Volumen sobre capacidad menor a 0.5 de los arcos de la Red del Pumabús - Asignación SUE entre las 15-16 horas con cambio en ponderaciones

Ruta	Número de Tramos con VOC<0.5	Mínimo VOC	Máximo VOC
Ruta 1	4	0,3336	0,3888
Ruta 2	5	0,2865	0,4449
Ruta 3	5	0,3616	0,4902
Ruta 4	7	0,1031	0,4737
Ruta 5	18	0,0482	0,3804
Ruta 6	28	0,0063	0,1489
Ruta 7	8	0,0724	0,4554
Ruta 8	20	0,0319	0,3885
Ruta 9	15	0,1089	0,4146
Ruta 10	27	0,0059	0,3280
Ruta 11	14	0,0460	0,3539
Ruta 12	14	0,0060	0,1527
Ruta 12'	20	0.0007	0.1814
TOTAL	185		

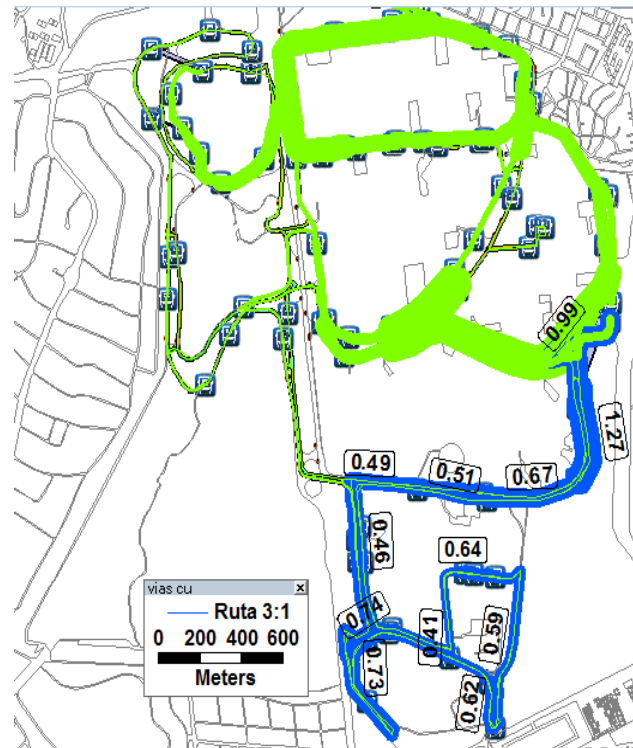
*Tabla 4.10– Número de tramos con VOC<0.5 como resultado de la asignación SUE entre las 15 a 16 horas con cambio en ponderaciones*



*Figura 4.2.22 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 1- Asignación SUE entre las 15-16 horas con cambio en ponderaciones*

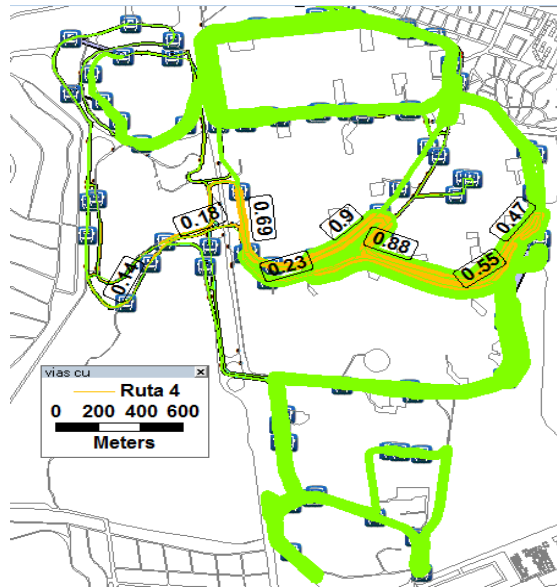


**Figura 4.2.23** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 2- Asignación SUE entre las 15-16 horas con cambio en ponderaciones

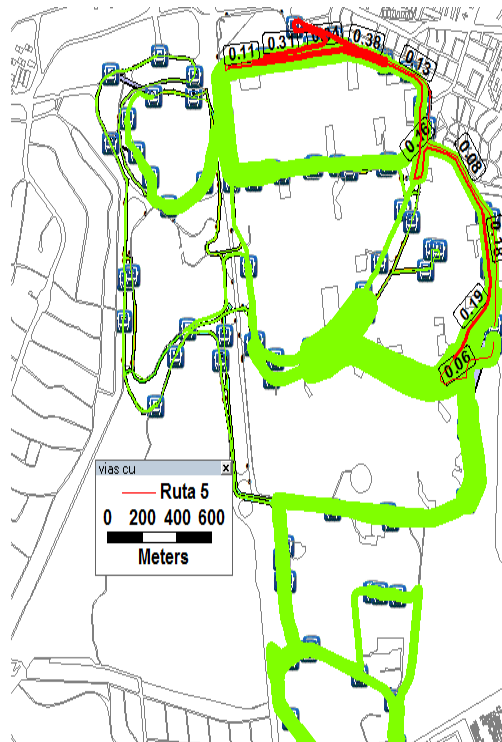


**Figura 4.2.24** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 3- Asignación SUE entre las 15-16 horas con cambio en ponderaciones

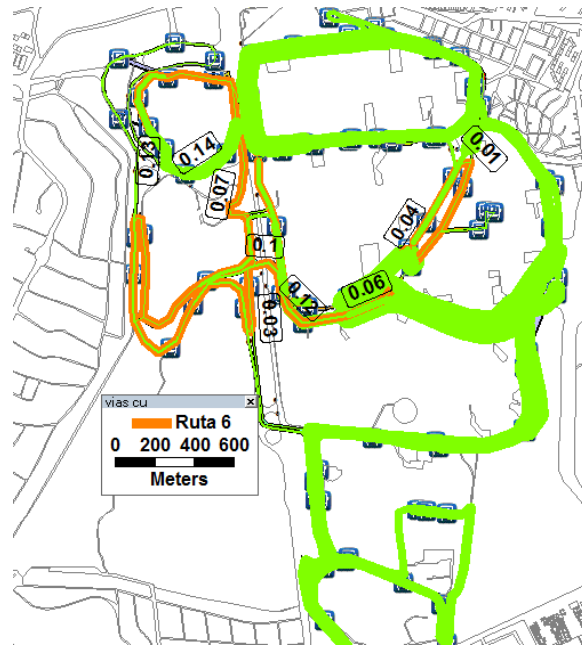




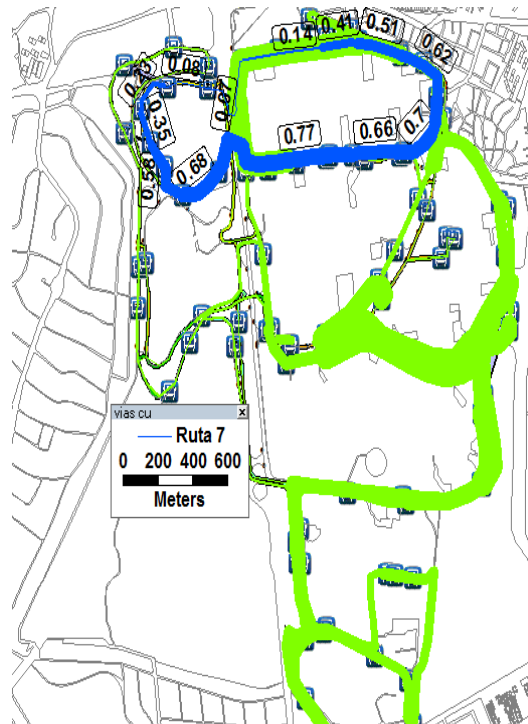
**Figura 4.2.25** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 4- Asignación SUE entre las 15-16 horas con cambio en ponderaciones



**Figura 4.2.26** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 5- Asignación SUE entre las 15-16 horas con cambio en ponderaciones



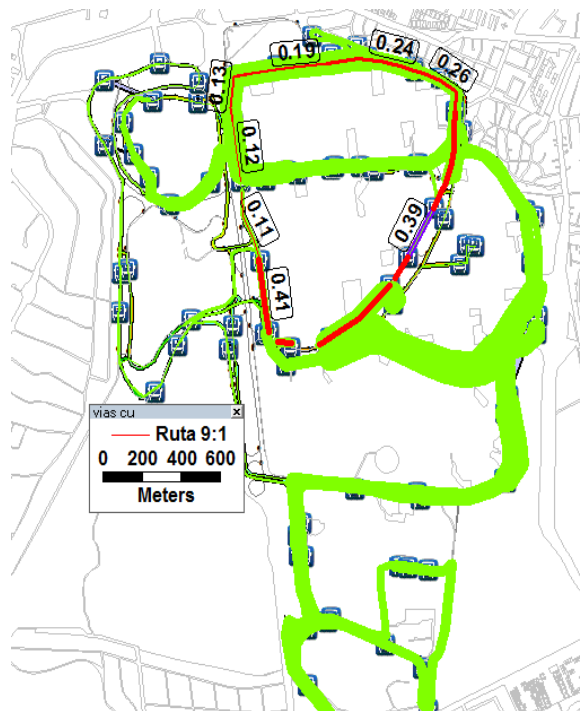
**Figura 4.2.27** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 6- Asignación SUE entre las 15-16 horas con cambio en ponderaciones



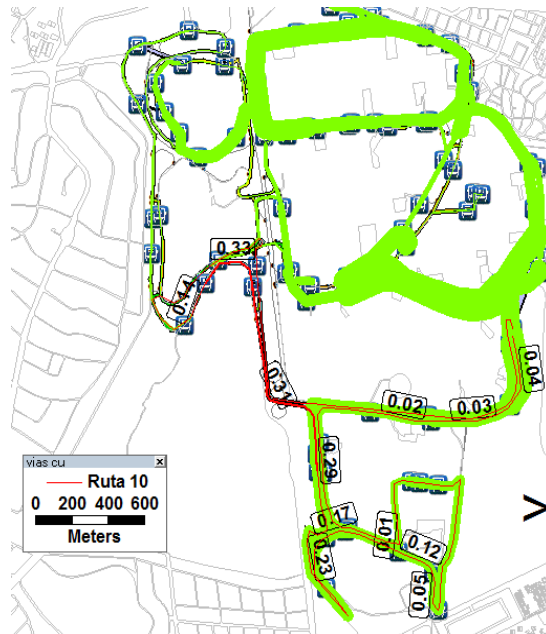
**Figura 4.2.28** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 7- Asignación SUE entre las 15-16 horas con cambio en ponderaciones



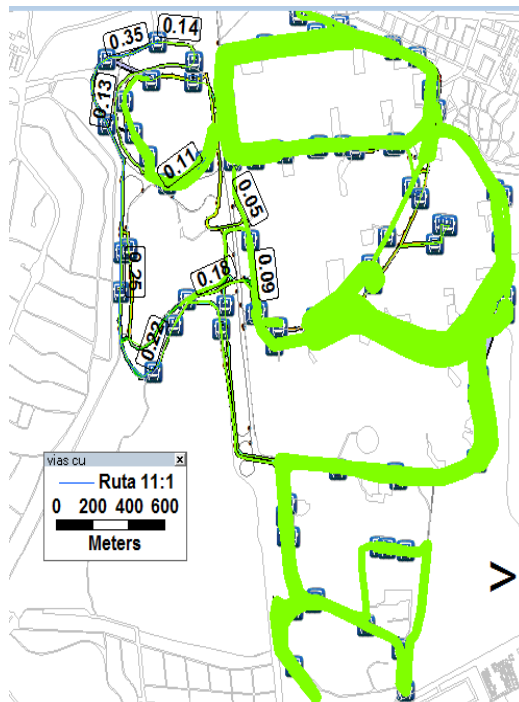
*Figura 4.2.29 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 8- Asignación SUE entre las 15-16 horas con cambio en ponderaciones*



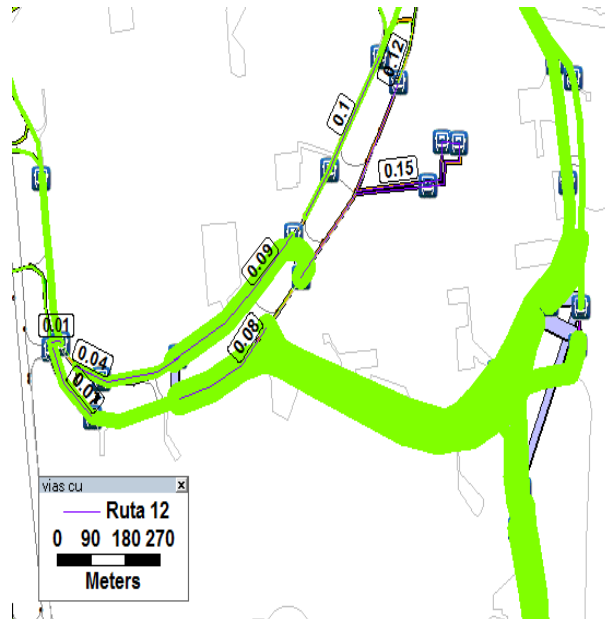
*Figura 4.2.30 Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 9- Asignación SUE entre las 15-16 horas con cambio en ponderaciones*



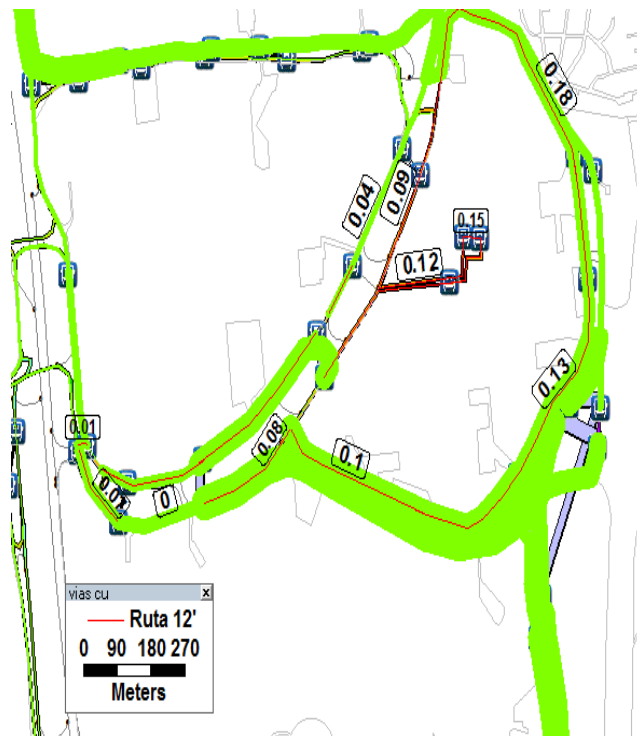
**Figura 4.2.31** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 10- Asignación SUE entre las 15-16 horas con cambio en ponderaciones



**Figura 4.2.32** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 11- Asignación SUE entre las 15-16 horas con cambio en ponderaciones



**Figura 4.2.33** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 12- Asignación SUE entre las 15-16 horas con cambio en ponderaciones



**Figura 4.2.34** Volumen sobre capacidad de los arcos de la Ruta 12'- Asignación SUE entre las 15-16 horas con cambio en ponderaciones

Las asignaciones que se realizaron en esta sección y en la sección 4.2.3 muestran que la mayor congestión para la primera hora de máxima demanda (7- 8 horas) se presenta entre los tramos que comunican las paradas aledañas al metro Ciudad Universitaria con paradas como Ciencias Circuito Exterior, Contaduría, Trabajo Social y Ciencias Políticas, y en el tramo entre la parada de Odontología Sur y la parada Química; los VOC. Para la segunda hora (15 a 16 horas) se evidencia que los tramos de máxima congestión se presentan en los tramos entre las paradas como Ciencias Circuito Exterior, Contaduría, Trabajo Social y Ciencias Políticas y las paradas aledañas a la estación del metro Ciudad Universitaria (el tramo es igual para la primera hora de máxima demanda pero en sentido contrario, puesto que en esta hora la mayor proporción de viajes son generados, es decir, salen de CU), además se evidencia que en esta hora se presenta un incremento importante en los flujos presentes en la zona norte de CU, debido a la actividad que se presenta en los estacionamientos ubicados en el Estadio Olímpico.

De las asignaciones también se evidencia que el modelo de asignación utilizado es sensible al cambio de los parámetros, por ejemplo en la primera hora de máxima demanda los resultados de la asignación con el cambio de parámetros muestran que el número de rutas con arcos que presentan  $VOC > 1$  incrementa, mientras que para la segunda hora los resultados muestran que a pesar de que los tramos con  $VOC > 1$  disminuye, el número de rutas y las rutas que presentan estos tramos se mantiene igual, de aquí la importancia de calibrar el modelo para cada una de las horas de interés con el objetivo de que el modelo represente la realidad y poder hacer un adecuado diagnóstico de la red.

#### **4.2.5 Tamaño de flota vehicular**

El cálculo del tamaño de flota vehicular para cada una de las horas de máxima demanda se llevó a cabo siguiendo el procedimiento descrito en la sección 1.8, sin embargo, como se mencionó en dicha sección el procedimiento expuesto sólo es válido para redes en las cuales no existe traslape de rutas y cuya flota es homogénea, el cual claramente no es el caso del Púrabús. No obstante, este procedimiento nos da una aproximación con la que es posible comparar el tamaño de flota actual. El volumen de diseño de cada ruta es el flujo máximo en cada ruta que determinó la asignación con cambio de ponderaciones para cada una de las horas de máxima demanda. El cálculo del tamaño de flota vehicular se muestra en la tabla 4.11.

El tamaño de la flota vehicular que se obtuvo para cada una de las horas de máxima demanda es menor que las frecuencias del Púrabús que se presentan en la sección 2.3.2, por lo que se pensaría que el Púrabús cuenta con el tamaño vehicular adecuado, no obstante, este procedimiento no toma en cuenta la acumulación del flujo de pasajeros en algunos arcos de la red, lo que se observa en los  $VOC > 1$  de las figuras de las secciones 4.2.3 y 4.2.4.

RUTA	Volumen de Diseño (P) (7-8 horas)	Volumen de Diseño(P) (15-16 h)	Tiempo de Ciclo (min)	Capacidad Vehicular	Factor de Ocupación	Frecuencia de Operación(Veh/h) (7-8 h)	Intervalo de Operación (7-8 h)	Frecuencia de Operación(Veh/h) (15-16 h)	Intervalo de Operación (15-16 h)	Tamaño de Flota (7-8 h)	Tamaño de Flota (15-16 h)
1	228	301	43	82	0.9	3.09	19.42	4.08	14.71	3	3
2	687	363	21	100	0.9	7.63	7.86	4.03	14.88	3	2
3	536	311	34	86	0.9	6.93	8.66	4.02	14.93	4	3
4	213	141	25	62	0.9	3.82	15.72	2.53	23.74	2	2
5	250	89	35	72	0.9	3.86	15.55	1.37	43.69	3	1
6	37	16	39	70	0.9	0.59	102.16	0.25	236.25	1	1
7	296	199	29	100	0.9	3.29	18.24	2.21	27.14	2	2
8	34	86	32	100	0.9	0.38	158.82	0.96	62.79	1	1
9	88	78	28	100	0.9	0.98	61.36	0.87	69.23	1	1
10	79	27	49	80	0.9	1.10	54.68	0.38	160.00	1	1
11	80	36	26	100	0.9	0.89	67.50	0.40	150.00	1	1
12	18	10	18	60	0.9	0.33	180.00	0.19	324.00	1	1
12'	NA	11	28	60	0.9	NA	NA	0.20	294.55	NA	1
Total Parque Vehicular										27	23

**Tabla 4.11– Tamaño de Flota Vehicular para las Horas de Máxima Demanda del Pumabús**

#### 4.2.6 Trabajo futuro

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten evidenciar la necesidad de diseñar las rutas del Pumabús de forma que no existan secciones de ruta congestionadas o con bajo nivel de utilización, además de satisfacer el total de la demanda determinada en el capítulo 3. Además, los productos de este trabajo proveen la información necesaria para llevar a cabo el diseño de rutas.

Según Molinero Molinero y Sánchez Arrellano (1997) las principales metas al diseñar una red de transporte público son: transportar el máximo número de pasajeros, alcanzar la máxima eficiencia operativa al mínimo costo y disminuir los impactos negativos a los que haya lugar. Una ruta debe ser diseñada de tal forma que sus flujos estén equilibrados, es decir, el recorrido debe ser justificado por la demanda en sus dos direcciones. A continuación, se presentan algunos trabajos en los que se aborda el problema de diseño de rutas en redes de transporte, y los cuales pueden guiar el diseño de rutas del Pumabús.

El problema de diseño de redes de transporte (The Transit Network Design Problem:TNDP), tiene por objetivo la creación de un grupo de rutas en un área en particular, donde cada ruta está determinada por una secuencia de paradas de autobús para satisfacer la demanda. Este tipo de modelos buscan disminuir el número de transferencias de los pasajeros, las distancias de los recorridos o número de rutas, entre otros. La información necesaria para este tipo de modelo es: la topología del área definida por vías, posibles paradas de autobuses, terminales y zonas de transferencia, así como también es necesario contar con una matriz de origen-destino (Guihaire y Hao, 2008).

Mahdi Amiripour, Cede, y Shariat Mohaymany (2014) mencionan que el diseño de rutas es altamente sensible a los cambios en la demanda de transporte público, el analizar los cambios en la demanda de transporte para el diseño de las redes de transporte aumenta la complejidad de los modelos, considerándose como problemas NP-Hard, por lo cual los autores proponen

solucionarlo mediante un algoritmo genético. En su artículo se planteó un diseño de ruta de buses con el objetivo de construir una red de autobuses que mejor se adapte a la demanda de todas las horas y todas las estaciones. La variación de la demanda, es caracterizada por cambios en atributos como la tarifa, tiempos de viaje, frecuencia de servicio, ruteo y transferencias, paradas, confort e inconvenientes, información, factores socio-económicos, factores externos (uso del suelo, seguridad), turismo y competencia con otros servicios de transporte. La función objetivo del modelo es minimizar el tiempo total de viaje sujeto a que la demanda de nodo a nodo esté satisfecha. El método que se desarrolló se aplicó en la ciudad de Mashhad en Irán con 3.2 millones de residentes y 20 millones de visitantes anuales.

Szeto y Jiang (2014) desarrollaron un modelo en el cual el diseño de las rutas de transporte, la escogencia de ubicación de paraderos y las frecuencias de cada ruta son determinados simultáneamente bajo restricciones de capacidad. El objetivo del modelo es minimizar el número de transferencias. Su solución se llevó a cabo con un algoritmo híbrido de colonia de abejas, éste diseña la estructura de la ruta para la cual la estrategia de aceptación o eliminación de un nodo depende de la demanda de pasajeros. Propone además una búsqueda en dirección descendente para determinar el grupo de frecuencias óptimas. El algoritmo fue probado en Tin Shui Wai (Hong Kong), donde se identificó el problema con el sobrecupo de pasajeros en la red (la red cuenta con 23 nodos y 7 terminales de buses) y viajes con número de transferencias mayores a uno. Las variables de decisión planteadas son: el número de pasajeros que hicieron transferencia de una vía  $t$  a un destino  $e$ , el flujo en la línea  $a$  con destino  $e$ , el tiempo total de espera en el nodo  $i$  para todos los flujos con destino  $e$ , la frecuencia de la ruta  $r$  y el nodo potencial en el nodo  $i$  que se necesita en el sub-tour de eliminación para la ruta de autobús  $r$ . También contempla variables binarias para decidir las siguientes circunstancias: si se pasa a través del nodo  $j$  inmediatamente después del nodo  $i$ , si la ruta  $r$  inicia en el nodo  $j$ , si la ruta  $r$  finaliza en el nodo  $i$  y si la ruta  $r$  no es viable.

Nikolić y Teodorović (2014) abordaron también el problema del diseño de rutas, con un modelo en el cual simultáneamente se determinan los enlaces para ser incluidos en la red y las frecuencias de cada una de las rutas diseñadas. De igual forma que el artículo analizado anteriormente también plantea un algoritmo meta-heurístico para su solución: el algoritmo colonia de abejas (Bee Colony Optimization BCO). Este algoritmo se probó en la red de Mandl que contiene 15 nodos, 21 bordes y 15,570 pasajeros (1979), bajo supuestos de capacidad homogénea y tiempo de transferencia para los pasajeros es de 5 minutos. Finalmente, los autores realizan una comparación entre el algoritmo propuesto y otros algoritmos planteados por otros autores, para ello, utilizaron parámetros como: porcentaje de demanda satisfecha con cero transferencias, porcentaje de demanda satisfecha con una transferencia, porcentaje de demanda satisfecha con dos transferencias, porcentaje de demanda insatisfecha y el total de



tiempo de viaje de todos los pasajeros, mostrando que el uso de un algoritmo como éste es más eficiente para la solución de este tipo de problemas.

## 5. CONCLUSIONES

Los criterios más importantes para determinar el nivel de servicio deben ser la frecuencia, confort, regularidad y cobertura (Molinero Molinero y Sánchez Arrellano,1997). La determinación de una combinación óptima de estos factores puede generar un incremento en el uso del transporte público, generar descensos en la congestión además de los tiempos de viaje, y aun así ser un sistema rentable financieramente. Para llegar a ello, es necesario identificar las necesidades de viajes reales del sistema, para un posterior diagnóstico de su estado actual o de un escenario futuro.

La falta de información y de recursos necesarios para hacer un análisis detallado sobre la demanda del Sistema Interno de Ciudad Universitaria: Pumabús, fue la razón principal por la cual se planteó la metodología utilizada en esta tesis para identificar las necesidades de viaje de la población universitaria. Esta metodología provee una matriz origen-destino razonable dada la distribución geográfica y de población del campus universitario. Entre las características que presenta, para concluir que es una matriz aproximada a la realidad, están las siguientes:

1. Las facultades de mayor población son las que atraen o generan mayor número de viajes.
2. La proporción de viajes internos con una distancia significativa (para que exista la posibilidad de realizar el viaje en Pumabús) que realizan las personas que llegan a CU en vehículo particular entre las 7 a 8 horas es mínima (figura 3.19), por cuanto las personas que llegan en este lapso de tiempo aún logran dejar su vehículo cerca de la facultad en donde laboran o estudian, en consecuencia, sus recorridos entre el estacionamiento y su facultad son de longitudes cortas.
3. Los viajes internos realizados por usuarios que egresan de CU en vehículo particular entre las 15 horas a las 16 horas son de recorridos largos y variados (figura 3.33), hecho que se considera como real bajo el análisis de que una gran cantidad de vehículos que llegan en el transcurso del día a CU no logran un lugar en los estacionamientos aledaños a sus destinos internos, por lo cual es necesario hacer uso de estacionamientos lejanos, así el viaje que deben realizar las personas para ir por su vehículo tiene una distancia considerable.

Además, es importante resaltar sobre la metodología propuesta para la obtención de la matriz origen-destino, que el algoritmo de estimación de los viajes internos como resultado de los viajes atraídos o generados por CU en vehículos representa el factor de mayor variabilidad e importancia entre los patrones de viaje entre la primera y la segunda hora de máxima demanda, es decir, para los viajes atraídos o generados mediante otros modos de transporte la diferencia entre una hora u otra sólo está determinada por el número de viajes atraídos o generados por el modo de transporte en cuestión, dado que la demanda de viajes atraídos o

generados en X modo de transporte por una parada determinada siempre se asigna a la misma estación, independiente de la hora del día; pero la diferencia de los viajes internos resultado de los viajes atraídos o generados en vehículo entre una hora u otra radica básicamente en el orden en el cual se asignan los viajes a cada estacionamiento, de aquí la importancia que esta asignación sea lógica y representativa. A pesar de que la matriz resultante parece ser acorde a la realidad, es aconsejable realizar pequeños estudios que permitan corroborar o ajustar los porcentajes de la distribución de estos viajes entre las facultades y los estacionamientos.

De igual forma el modelo utilizado para la asignación de transporte público provee resultados que se creen aproximados a la realidad, esto por el hecho de que los mayores porcentajes de utilización y congestión los poseen las rutas que realizan recorridos entre las paradas aledañas a la estación Metro Ciudad Universitaria (estación de gran afluencia) y paradas con gran cantidad de población; de igual forma, concuerda con la realidad por el hecho de que las rutas con menor índice de utilización son las rutas 6, 10, 11 y 12, puesto que sus recorridos no conectan paradas aledañas a estaciones de gran número de viajes atraídos o generados, las cuatro rutas conectan las estación del Metrobús Ciudad Universitaria, pero este modo de transporte no es significativo ni en número de viajes atraídos ni generados, y al parecer dos rutas bastan para cubrir la demanda.

Los resultados de la metodología que se presenta en esta tesis provee la justificación necesaria para concluir que bajo los supuestos de demanda y parámetros que modelan el comportamiento del usuario en la selección de ruta, la red actual del sistema no opera eficientemente, debido al desbalance de sus factores de carga los cuales pueden ser notoriamente mejorados. Sin embargo, estos resultados no son validados, es decir no se garantiza que el modelo represente la realidad, para lograrlo se debe realizar la calibración de los parámetros del modelo de asignación de transporte público con la metodología presentada en la sección 4.15.

Los procesos de modelación que se presentan en esta tesis tanto para determinar las necesidades de viajes como para realizar la asignación de transporte público son el soporte para la toma de decisiones de los sistemas de transporte de pasajeros o de otros sectores como la planeación urbana, puesto que proveen el conocimiento necesario para evaluar el estado actual del sistema y también, evaluar los posibles escenarios que pueden plantearse buscando la mejora del sistema de transporte o de la calidad de vida de los habitantes de una ciudad, estos escenarios pueden construirse a partir de las modificaciones que se realicen a las rutas existentes y a sus parámetros de operación pero también por los cambios que se realicen a nivel urbano como la distribución de estacionamientos en la ciudad o la creación de nuevos

centros de atracción o generación de viajes, como por ejemplo evaluar el impacto generado por la creación de un centro de negocios o una institución educativa en cierta zona de la ciudad. Dada la magnitud de los impactos que pueden causar los cambios como resultado de la toma de decisiones en la de planeación urbana se reitera la necesidad de calibrar los modelos de tal forma que éstos representen la realidad y los cambios sugeridos verdaderamente representen una mejora para la ciudad.

## REFERENCIAS

- Alaceda, A. (1997). *Operación de los Transportes*. México: Secretaria de Transportes y Vialidad del Distrito Federal.
- Barceló, J. (2010). Calibration and Validation of Traffic Simulation Models. In J. Barceló (Ed.), *Fundamentals of Traffic Simulation* (pp. 37–56). Barcelona: Springer.
- Caliper Corporation. (2004). *Travel Demand Modeling with TransCAD 4.7*.
- Ciuffo, B., Punzo, V., y Torrieri, V. (2007). A Framework for Calibrating Microscopic Traffic Simulation Models. *Proceedings of the 86th TRB Annual Meeting*. Washington, DC.
- Consorcio Transportes Madrid. (2016). Consorcio Transportes Madrid. Recuperado Abril 28, 2016, de <http://www.crtm.es/tu-transporte-publico/cercanias-renfe/lineas.aspx>
- Daganzo, C., y Sheffi, Y. (1977). On Stochastic Models of Traffic Assignment. *Transportation Science*, 11, 253–274.
- De Cea, J., y Fernandez, E. (1993). Transit Assignment for Congested Public Transport Systems: An Equilibrium Model. *Transportation Science*. doi:10.1287/trsc.27.2.133
- DGSG-UNAM. (2016). Pumabús. Recuperado Septiembre 12, 2016, de <http://www.pumabus.unam.mx/rutas.html>
- Diario de México. (2013, Julio). Podrían cambiar nombre a las estaciones del Metro. *Diario de México*. Recuperado Abril 28, 2016 de <http://www.diariodemexico.com.mx/>
- Dirección General de Planeación. (2015). Agenda Estadística UNAM. Recuperado Febrero 25, 2015, de <http://www.planeacion.unam.mx/Agenda/>
- El Servicio de Transportes Eléctricos del Distrito Federal (STE). (2015). Recuperado Diciembre 8, 2015, de <http://www.ste.cdmx.gob.mx/index.html?page=1ylinea=1>
- FHWA. (2004). Traffic Analysis Toolbox Volume II : Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software. *FHWA-HRT-04-040, FHWA, US Department of Transportation*. Recuperado Abril 28, 2016 de [http://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/tat\\_vol3/vol3\\_guidelines.pdf](http://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/tat_vol3/vol3_guidelines.pdf)
- Farris, M. T., y Harding, F. E. (1976). *Passenger Transportation*. NEW JERSEY: PRETINCE-HALL, INC.
- Gobierno del Distrito Federal. (2014). Aviso por el que se expiden los manuales técnicos de seguridad, accesibilidad, comodidad y fabricación de autobuses nuevos, corto, mediano y largo, de piso alto, entrada baja y motor de aplicación delantera y trasera para prestar el servicio público de tr. *Gaceta Oficial Del Distrito Federal*. Secretaría de Movilidad del Distrito Federal, Gobierno del Distrito Federal.

- Gobierno del Distrito Federal (14 de julio de 2014)). Ley de Movilidad del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal No 1989Bis. Recuperado Abril 28, 2016 de <http://www.aldf.gob.mx/leyes-107-2.html>
- Gobierno del Distrito Federal (17 de agosto de 2015). Reglamento de Tránsito del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal No 156Bis. Recuperado Abril 28, 2016 de [http://www.ssp.df.gob.mx/reglamentodetransito/documentos/nuevo\\_reglamento\\_transito.pdf](http://www.ssp.df.gob.mx/reglamentodetransito/documentos/nuevo_reglamento_transito.pdf)
- Gobierno del Distrito Federal. (30 de diciembre de 2003). Reglamento de Transporte del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal No102-TER. Recuperado Abril 28, 2016 de <http://cgsservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/r33204.htm>
- Gracia, J. (2012). Plan verde sustentable para el DF. Recuperado Abril 28, 2016 de <http://www.mexicomediasservice.com/>
- Guihaire, V., & Hao, J.-K. (2008). Transit Network Design and Scheduling: A Global Review. *Transportation Research Part A*, 42, 1251–1273.
- Gutiérrez, L. (2012). Integrated Transit Systems and Bus Rapid Transit in Latin America: Achievements and Challenges.
- Instituto Geografico Nacional. (2014). iberpix. Recuperado Diciembre 5, 2015, de <http://www.ign.es/iberpix2/visor/>
- Koski, R. W. (1992). Bus Transit. In G. Gray y L. Hoel (Eds.), *Public Transportation* (Segunda, pp. 150–152). PRETINCE-HALL, INC.
- Lam, S.-H., y Xie, F. (2002). Transit Path-Choice Models That Use Revealed Preference and Stated Preference Data. *Transportation Research Record*. doi:10.3141/1799-08
- Lam, W., Gao, Z. ., Chan, K. ., y Yang, H. (1999). A Stochastic User Equilibrium Assignment Model for Congested Transit Networks. *Transportation Research Part B*, 33, 3050–3059. doi:10.1061/40996(330)450
- Larwin F., T. (1999). Urban Transit. In *Transportation Planning Handbook* (Edwards, J). Washington: Institute of Transportation Engineers.
- Liu, Y., Bunker, J., y Ferreira, L. (2009). Modelling Urban Public Transit Users Route Choice Behaviour: Review and Outlook. *QUT Digital Repository*, (March), 101–109.
- López Olvera, M. A. (2007). El Transporte De Pasajeros Y El Sistema Vial En La Ciudad De México. *Instituto de Investigaciones Jurídicas*, 259–281. Recuperado de [www.juridicas.unam.mx](http://www.juridicas.unam.mx)
- Lozano, A., Torres, V., y Antún, J. (2003). Tráfico vehicular. *Ciencias- Universidad Nacional Autónoma de México*, 70.

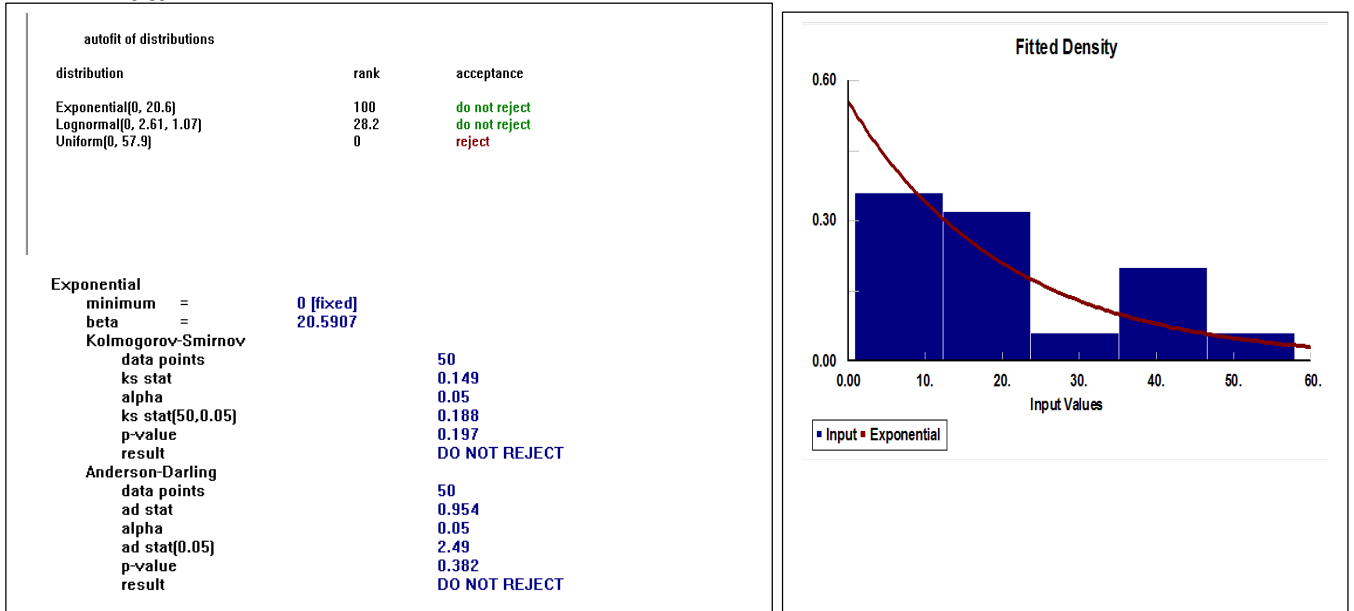
- Mahdi Amiripour, S. ., Cede, A., y Shariat Mohaymany, A. (2014). Designing large-scale bus network with seasonal variations of demand. *Transportation Research Part C*, 48, 322–338.
- Metrobús. (2014). Recuperado Diciembre 8, 2015, de <http://www.metrobus.cdmx.gob.mx/>
- Meyer, M. D., y Miller, E. J. (2001). *Urban Transportation Planning- A Decision -Oriented Approach* (Second). McGraw-Hill.
- Milioti, C. P., y Karlaftis, M. G. (2014). Estimating multimodal public transport mode shares in Athens, Greece. *Journal of Transport Geography*, 34, 88–95.  
doi:10.1016/j.jtrangeo.2013.11.005
- Molinero Molinero, A., y Sánchez Arrellano, L. I. (1997). *Transporte Público: Planeación, Diseño, Operación y Administración* (2a edición). México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Navas Quintero, A. (2008). Políticas de Transporte Público Urbano: Lecciones desde la Experiencia de TRANSANTIAGO \*. *Universidad Javeriana Bogotá D.C*, 4(1), 159–189.
- Nikolić, M., y Teodorović, D. (2014). A simultaneous transit network design and frequency setting: Computing with bees. *Expert Systems with Applications*, 41(16), 7200–7209.  
doi:10.1016/j.eswa.2014.05.034
- NYCMap360°. (2016). Recuperado Abril 22, 2016, de <http://nycmap360.com/nyc-bus-map#.V3ys67jhDIV>
- Parra, A., y Padilla, M. (2009). Encuesta Origen- Destino : Herramienta para determinar la movilidad en el servicio interurbano por ómnibus. Caso: Provincia Holguín. *Transporte, Desarrollo Y Medio Ambiente*, 29(No 1), 10–14.
- PlanParis360. (2014). Plan de Métro de Paris. Recuperado Diciembre 5, 2015, de <http://planparis360.fr/plan-metro-paris#.V3y0ebjhDIU>
- Red de Transporte de Pasajeros del Distrito Federal. (2015). Recuperado Diciembre 8, 2015, de <http://www.rtp.gob.mx/servicios.html#atenea>
- Rose, G., Daskin, M., y Koppelman, F. (1988). An examination of convergence error in equilibrium traffic assignment models. *Transportation Research B*, 22B(4), 261 –274.
- Rossi, F., y Mirtchev, V. (2016). *Statistics for Food Scientists. Statistics for Food Scientists*. Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-417179-4.00004-4
- Saaty, T., y Vargas, L. (2001). *Models, methods, concepts y applications of the analytic hierarchy process. ... -Driven Demand and Operations Management Models*.  
doi:10.1007/978-1-4614-3597-6
- SEMOVI. (2014). SEMOVI oficializa lineamientos para la fabricación y diseño de autobuses de

- transporte público. Recuperado Diciembre 5, 2014, de Pasajero7.com.mx
- Sheffi, Y. (1985). *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*. PRENTICE-HALL, Inc. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632. doi:10.1016/0191-2607(86)90023-3
- Sistema de Transporte Colectivo Metro. (2015). Recuperado Diciembre 5, 2015, de <http://www.metro.cdmx.gob.mx/>
- Slavin, H., Lam, J., y Nanduri, K. (2015). Traffic Assignment and Feedback Research to Support Improved Travel Forecasting. *Caliper*, 328. Recuperado Abril 28, 2016 de <http://www.caliper.com/PDFs/traffic-assignment-and-feedback-research-to-support-improved-travel-forecasting.pdf>
- Sussman, J. (2006). Transporte Urbano Público. In *Introducción a los Sistemas de Transporte* (pp. 277–280). SITESA.
- Szeto, W. Y., y Jiang, Y. (2014). Transit route and frequency design: Bi-level modeling and hybrid artificial bee colony algorithm approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 67, 235–263. doi:10.1016/j.trb.2014.05.008
- Tello de Meneses, R. R. (2010). Transporte público del DF: ¿tarificación por zonas?
- Vuchic, V. R. (1978). *Transit Operating Manual*. Harrisburg: Pennsylvania: Department of Transportation.
- Vuchic, V. R. (2007). *Urban Transit- Systems and Technology* (John Wiley).
- Wardrop, A. . (1979). *In Search of Standards of Service for Urban Public Transport*. Canberra: Department of Capital Territory.
- Wright, L., y Fjellstrom, K. (2004). *Opciones de Transporte Público Masivo* (Vol. 3). Proyecto de Transporte Urbano Sostenible (GIZ-SUTP). Recuperado de <http://www.sutp.org/es/>
- Yang, L., y Lam, W. H. K. (2006). Probit-Type Reliability-Based Transit Network Assignment. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1977(-1), 154–163. doi:10.3141/1977-20

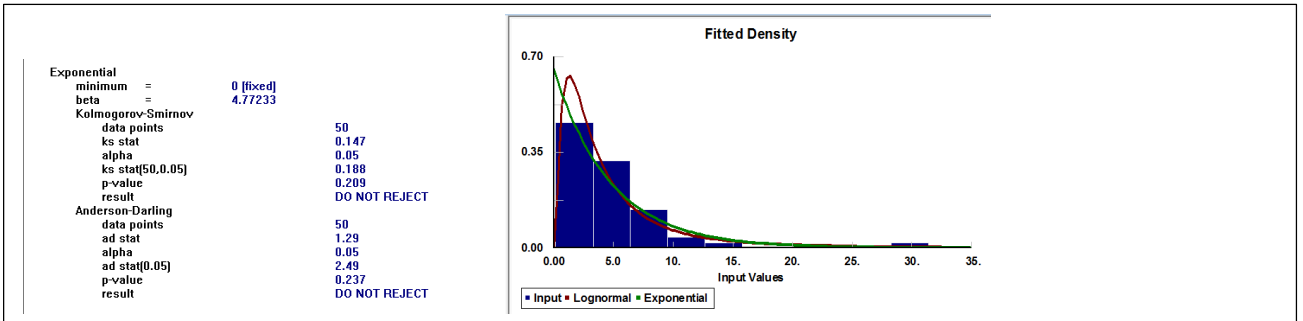


**Anexo 1: pruebas de bondad de ajuste de los tiempos de paso entre vehículos de las rutas del Pumabús**

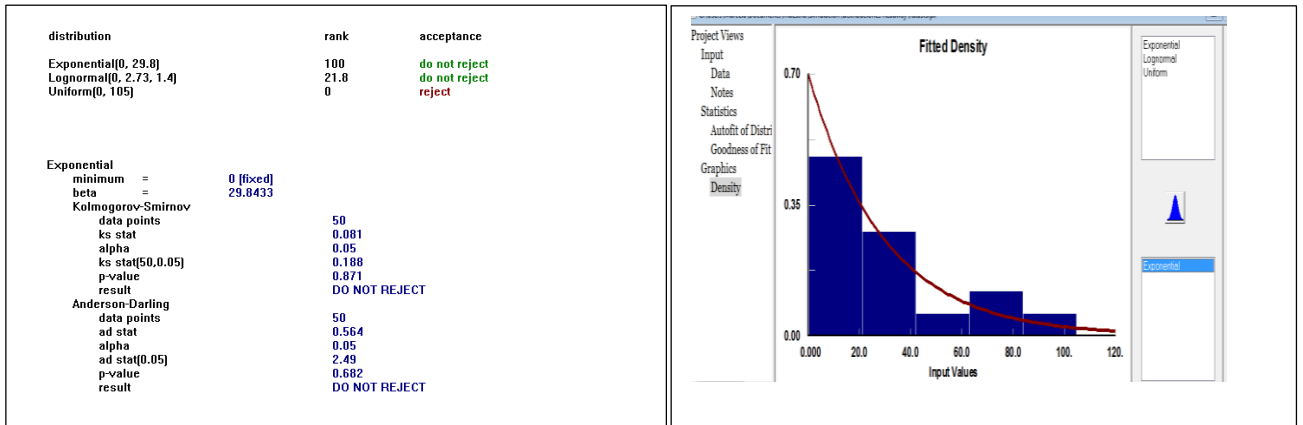
**Ruta 1**



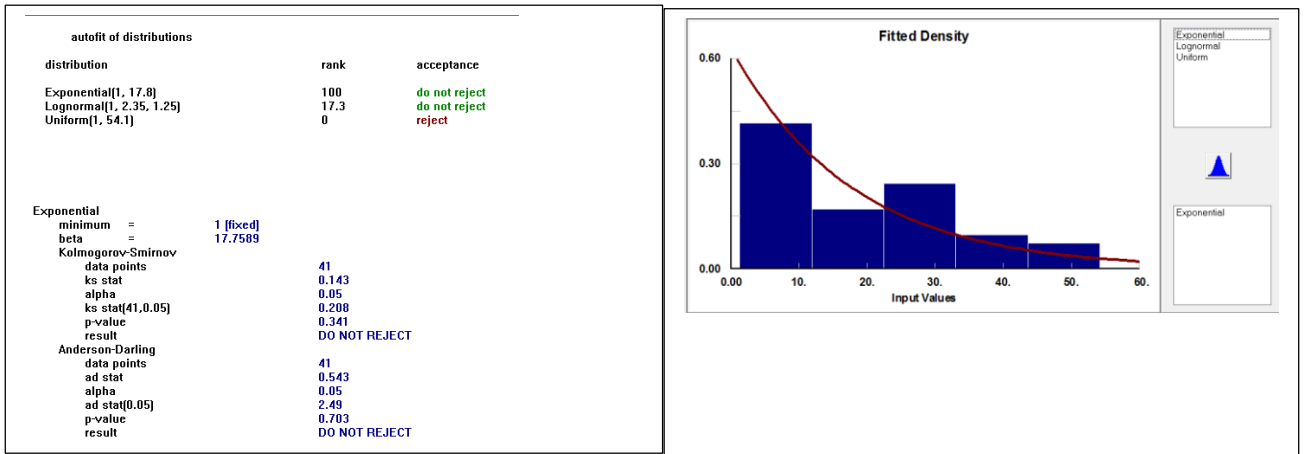
**Ruta 2**



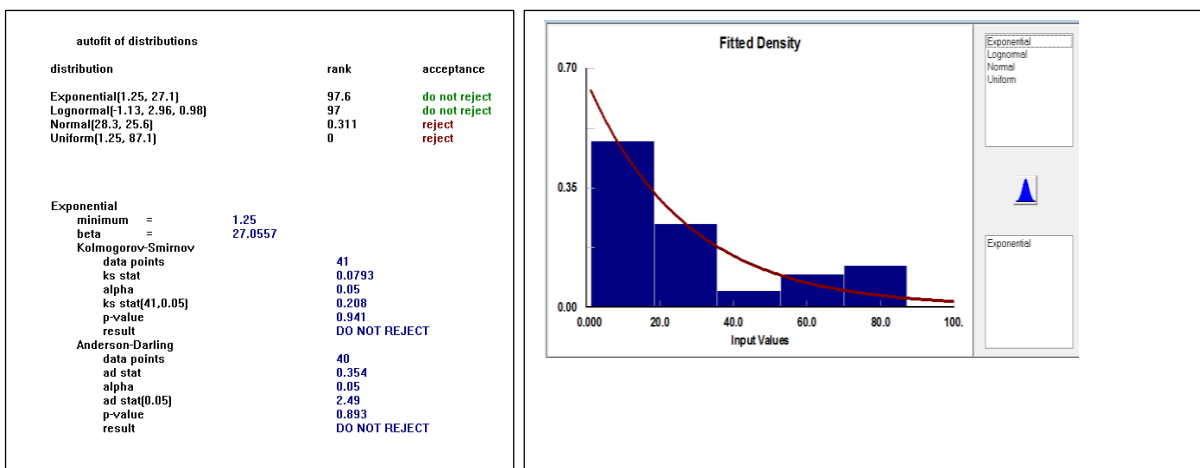
**Ruta 3**



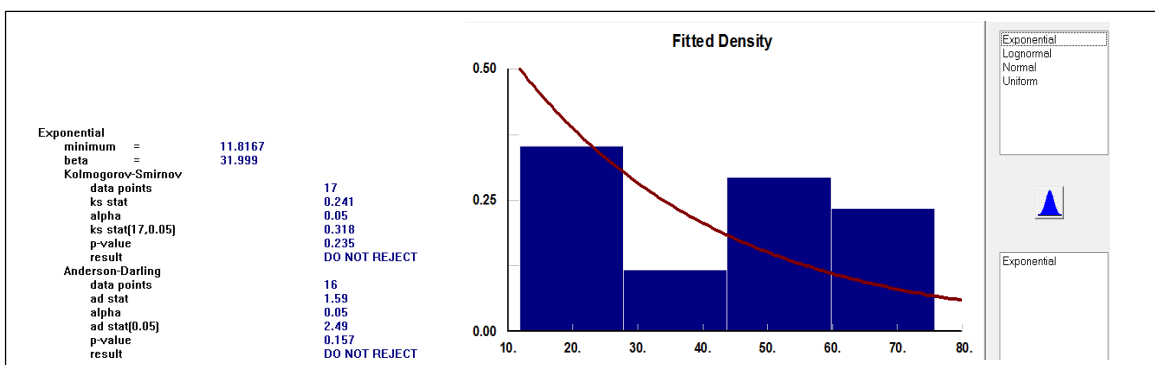
Ruta 4



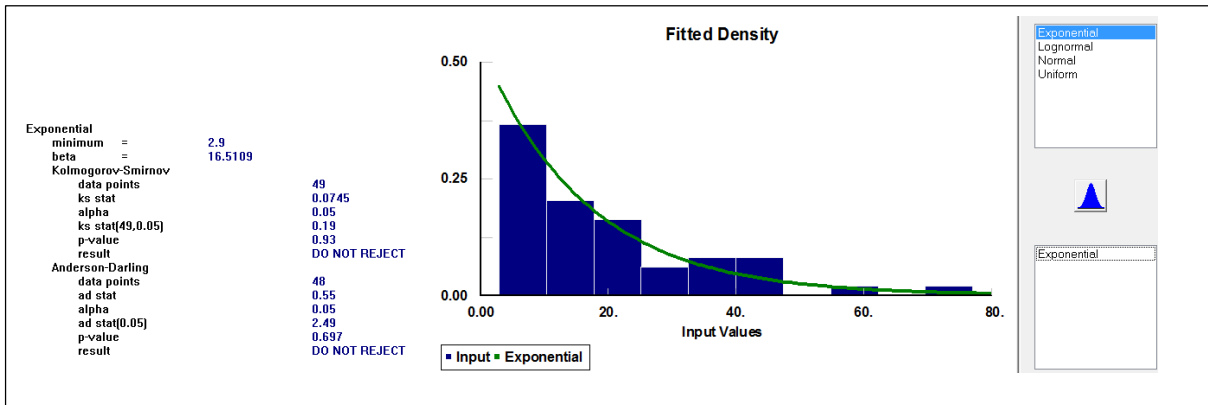
Ruta 5



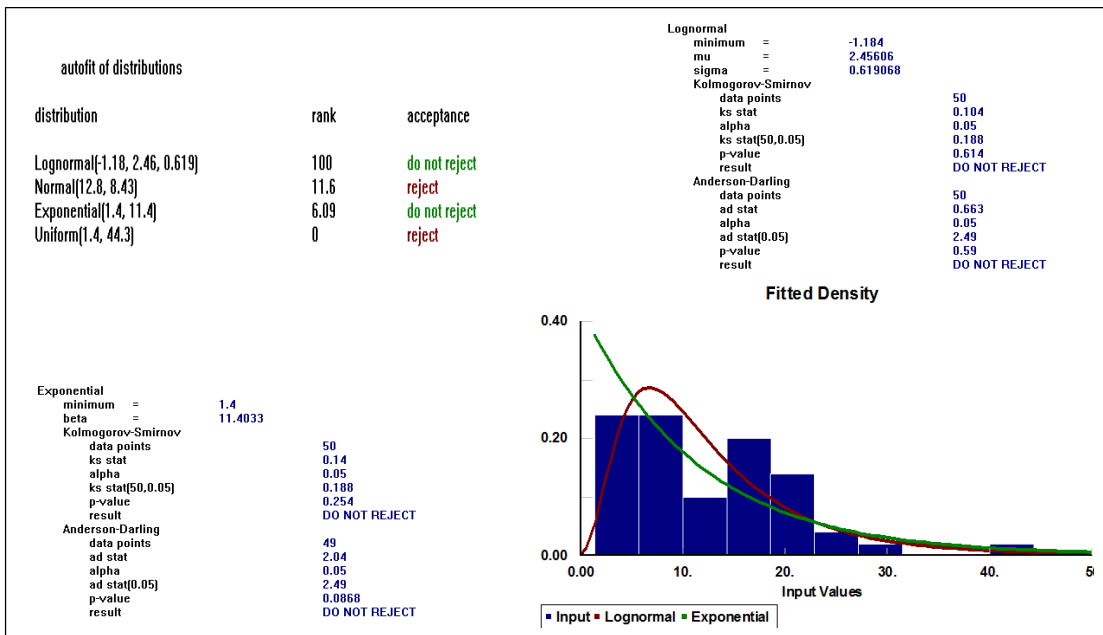
Ruta 6



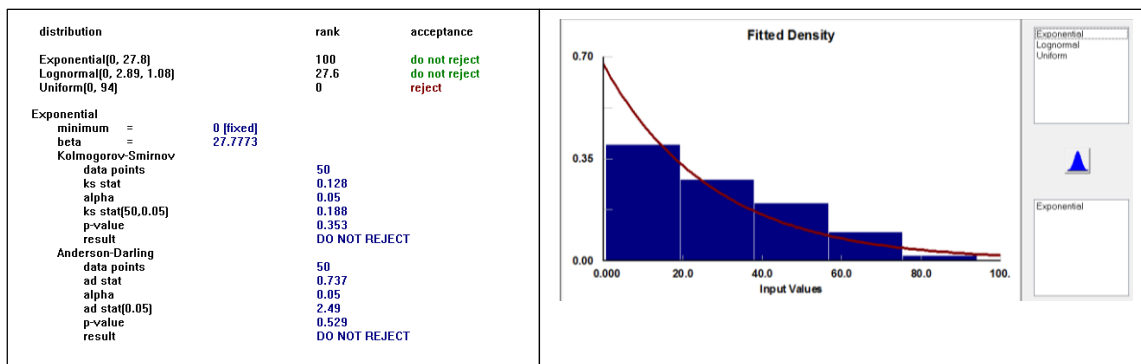
Ruta 7



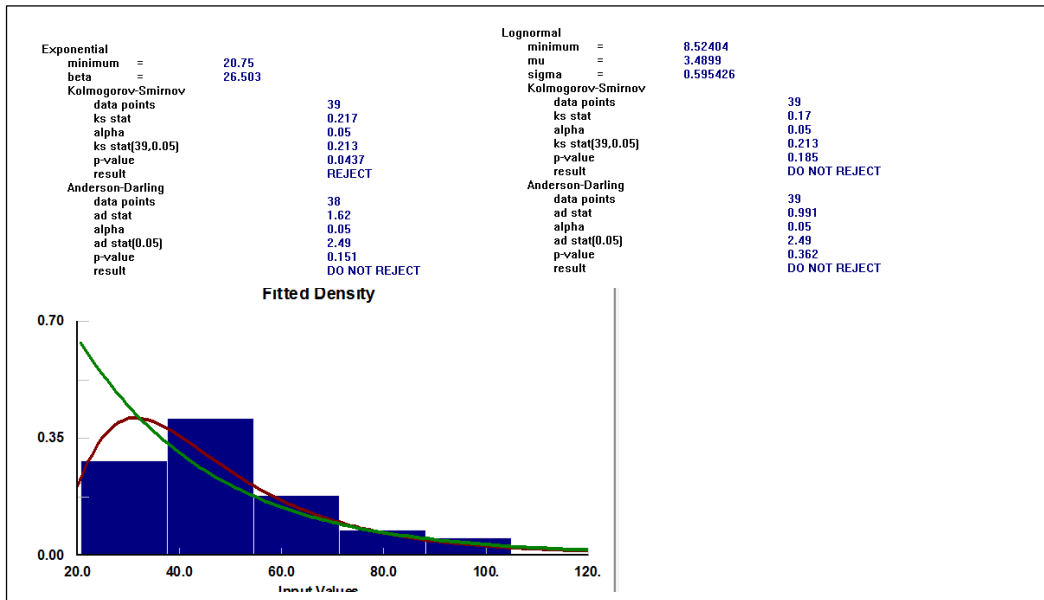
Ruta 8



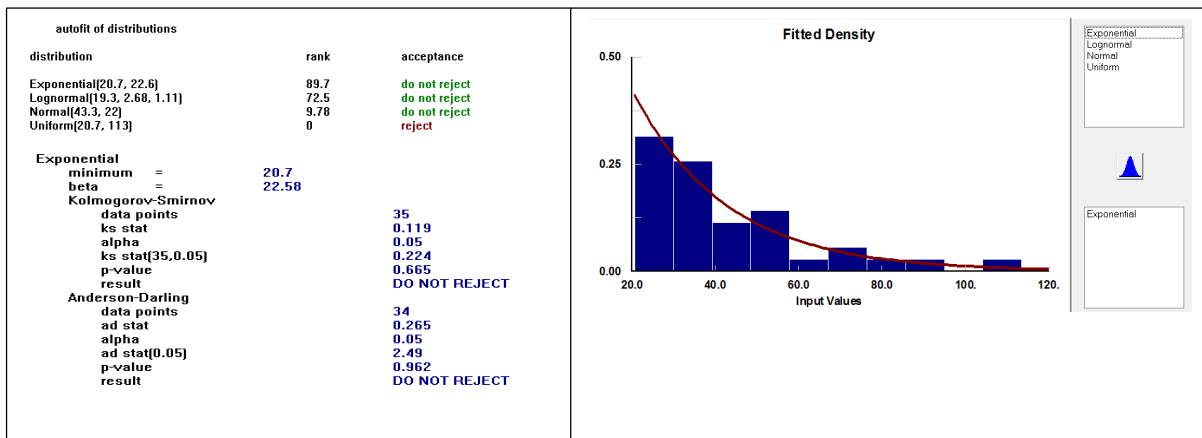
Ruta 9



Ruta 11



Ruta 12



## Anexo 2: Modelo Logit-Tamaño de Ruta (Size-Path)

$$P(i/C_n) = \frac{e^{\mu(V_{in} + \ln PS_{in})}}{\sum_{j \in C_n} e^{\mu(V_{jn} + \ln PS_{jn})}}$$

Donde:

$n$  representa la  $n$ -enésima persona,

$V_{in}$  la utilidad del  $i$ -ésimo camino,

$PS_{in}$  el tamaño variable del  $i$ -ésimo camino.

El tamaño de un camino depende de si contiene arcos que se comparten con otros caminos, así si la ruta contiene uno o más arcos compartidos su tamaño será menor que uno, pero si no hay traslape de caminos su tamaño será uno y no es necesario ajustar su función de utilidad. El tamaño de camino o ruta fue calculado con respecto a la longitud de los arcos pertenecientes al camino y la longitud relativa de los caminos que comparten el arco.

$$PS_{in} = \sum_{a \in \Gamma_i} \left( \frac{l_a}{L_i} \right) \frac{1}{\sum_{j \in C_n} \frac{L_j^Y}{L_j} \delta_{aj}}$$

Donde:

$A$ : índice del arco,

$\Gamma_i$ : conjunto de arcos en el camino  $i$ ,

$l_a$ : longitud del arco  $a$ ,

$L_i$ : longitud del camino  $i$ ,

$Y$ : Parámetro a estimar

$$\delta_{aj} = \begin{cases} 1 & \text{si el camino } j \text{ usa el arco } a \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

### Anexo 3: Algoritmo Frank-Wolfe

La información que se presenta en este anexo fue tomada de Sheffi (1985). El algoritmo de Frank y Wolfe fue propuesto como un proceso para solucionar problemas cuadráticos con restricciones lineales en 1956. Este método es útil para determinar los flujos de equilibrio para redes de transporte.

Dada una solución factible  $X^n$ , la  $n$ -ésima iteración del algoritmo puede resumirse como:

Paso 1. Encontrar la dirección.

Se encuentra  $Y^n$  que resuelva el siguiente programa lineal

$$\min z^n(y) = \nabla z(X^n) \cdot y^T = \sum_i \left( \frac{\partial z(X^n)}{\partial x_i} \right) y_i$$

Sujeto a

$$\sum_i h_{ij} y_i \geq b_j \quad \forall j \in J$$

Paso 2. Determinación del tamaño de paso.

Se debe hallar  $\alpha_n$  que resuelva el siguiente problema

$$\min_{0 \leq \alpha \leq 1} z[X^n + \alpha(y^n - X^n)]$$

Paso 3. Desplazamiento.

Hacer el conjunto  $X^{n+1} = X^n + \alpha_n(y^n - X^n)$ ,

Paso 4. Prueba de convergencia.

Si  $z(X^n) - z(X^{n+1}) \leq k$  entonces parar. De lo contrario hacer  $n=n+1$  e ir al paso 1.