UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
POSGRADO EN SISTEMAS – TRANSPORTE

PROPUESTA DE INCORPORACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN AL USUARIO Y VIALIDADES PEATONALES PARA PROPICIAR UN TRANSPORTE SUSTENTABLE EN COYOACÁN

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

P R E S E N T A
ALEJANDRO BENÍTEZ SOLANO

TUTOR PRINCIPAL:
DRA. ANGÉLICA DEL ROCÍO LOZANO CUEVAS
INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. MAYO 2014

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	(Dr. Aceves García Ricardo)
Secretario:	(M.I. Rivera Colmenero José Antonio)
Vocal:	(Dra. Lozano Cuevas Angélica Del Rocío)
1 er. Suplente:	(M.I. Guzmán Castro Luis Alejandro)
2 do. Suplente:	(M.I. Javier Granados Villafuerte Francisco)

Lugar donde se realizó la tesis:

FACULTAD DE INGENIERÍA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

TUTOR DE TESIS:

Dra. Angélica del Rocío Lozano Cuevas

FIRMA

A mis padres y hermanos que siempre me han ofrecido todo su apoyo, y a mi novia Rosario Martínez, que siempre confió en mí y no dejo que abandonara este proyecto.

Agradecimientos

Agradezco a mi tutora de tesis, la Dra. Angélica del Rocío Lozano Cuevas por guiarme en el desarrollo de esta investigación, al Ing. Francisco Salgado por su colaboración en el desarrollo del programa del algoritmo, a Minerva Soto por su apoyo en la comprensión del algoritmo y a los sinodales, el Dr. Aceves García Ricardo, el M.I. Rivera Colmenero José Antonio, el M.I. Guzmán Castro Luis Alejandro, y el M.I. Javier Granados Villafuerte Francisco por sus aportes al trabajo final. También agradezco al Lic. Humberto Nicolás, por su apoyo y estimulo en la realización de la presente maestría.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN ____ *1*

1. TRANSPORTE URBANO DE PASAJEROS ____ *5*

1.1 Transporte urbano de pasajeros ____ **5**

1.1.1 Tráfico vehicular ____ 7

1.1.2 Transporte Público Masivo ____ 8

1.1.3 Transporte de carga ____ 8

1.2 Transporte Sustentable ____ **9**

1.2.1 Tendencias del Transporte Sustentable ____ 11

1.2.2 Caminar ____ 12

1.2.3 Bicicleta ____ 12

1.2.4 Integración entre caminar y bicicleta ____ 13

1.2.5 Restricción de automóviles ____ 14

1.2.6 Ejemplos de aplicaciones de transporte sustentable ____ 17

1.3 Transporte de pasajeros en la Cd. de México ____ **22**

1.3.1 Automóvil ____ 23

1.3.2 Taxi ____ 23

1.3.3 Autobuses y microbuses ____ 24

1.3.4 Red de Transporte Público (RTP) ____ 24

1.3.5 Sistema Colectivo Metro ____ 27

1.3.6 Tren Suburbano ____ 29

1.3.7 Tren ligero ____ 29

1.3.8 Trolebús ____ 30

1.3.9 Metrobús ____ 30

1.3.10 Bicicleta ____ 32

1.4 Transporte en el centro de Coyoacán ____ **32**

1.4.1 Transporte urbano público y privado en la zona centro de Coyoacán ____ 35

Automóvil (Transporte privado) ____ 35

Trolebús ____ 35

Microbús ____ 35

RTP ____ 36

Metro ____ 37

Transporte de carga (Puntos de atracción) ____ 37

2. SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE ____ *39*

2.1 Historia de los SIT ____ **39**

2.2 ¿Qué son los SIT? ____ **41**

2.2.1 Definiciones de los SIT ____ 41

2.2.2 Beneficios y Problemáticas de los SIT ____ 43

2.2.3 Instituciones Internacionales SIT ____ 44

2.2.4 Áreas funcionales de los SIT 46
Ejemplos de Arquitecturas SIT 46
2.3 Clasificación de los SIT 52
Sistemas Avanzados de Información al Viajero 53
Sistemas Adaptativos para el Control de Tráfico 55
Sistemas Avanzados para el Control de los Vehículos 55
Sistema de Gestión de Flotas 56
Operaciones de Vehículos Comerciales 56
Sistemas Avanzados de Transporte Público 56
Gestión de Emergencia 57
Cobro Electrónico de Peajes 57
Sistema de Guías de Rutas 57
Sistema Avanzado de Gestión de Estacionamientos 58
2.4 Ejemplos de aplicaciones SIT 60
2.4.1 Ejemplos de aplicaciones SIT en ciudades Mundo 60
Estocolmo y Londres 60
California, E.U.A y Quebec, Canadá 62
Singapur 65
España 66
Bogotá 67
Reino Unido 68
Fronteras de Estados Unidos 69
2.4.2 Ejemplos de aplicaciones SIT en México 71
Centro de control de tráfico 71
Centro de Control de Mando del Metro de la Cd. de México 72
Servicio de rutas punto a punto (SCT) 74
SIT en autopistas y carreteras de México 75
3. REDES, HIPER-REDES E HIPER-RUTAS 79
3.1 Redes 79
3.1.1 Grafos Dirigidos 80
3.1.2 Hiper-grafos 83
3.2 Ruta más Corta 84
3.3 Hiper-Ruta Más Corta 86
3.3.1 Hiper-ruta multimodal 88
3.3.2 Hiper-ruta multimodal viable 88
Algoritmo “Shortest Viable Hyperpath in Multimodal Networks“ 90
4. ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO Y DIGITALIZACIÓN DE LA RED MULTIMODAL 95
4.1 Descripción de la problemática en la Zona de Estudio 95
Peatones 95
Estacionamientos 97
Transporte Público 97

4.2 Construcción las redes y la hiper-red 97

4.3 Construcción de la hiper-red multimodal 105

4.4 Análisis de la operación de la zona de estudio 107

4.5 Hacia una movilidad sustentable 109

5. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE HIPER RUTAS VIABLES EN REDES MULTIMODALES 111

5.1 Aplicación del algoritmo en la zona de estudio 111

5.2 Recopilación y tratamiento de la base de datos de la red 113

5.3 Programación del algoritmo "Shortest Viable Hyperpath in Multimodal Network" 117

6. PROPUESTA DE TRANSPORTE SUSTENTABLE Y SISTEMA DE INFORMACIÓN AL VIAJERO 127

6.1 Acciones de transporte sustentable factibles para el Centro de Coyoacán 127

6.2 Sistema de Información al Viajero para la situación actual en el Centro de Coyoacán 136

6.3 Sistema de Información al Viajero para la situación de transporte sustentable en el Centro de Coyoacán 146

CONCLUSIONES 149

REFERENCIAS 153

Anexo A 159

Anexo B 163

Anexo C 165

Anexo D 169

INTRODUCCIÓN

El constante aumento del parque vehicular en la Ciudad de México genera congestión vehicular, ruido, estrés, contaminación y otras externalidades, por lo que es recomendable hacer uso de las alternativas existentes de transporte público y fomentar el transporte alternativo como la bicicleta y el caminar para reducir el uso del automóvil, la aplicación de herramientas de información facilitan al viajero la utilización de la red de transporte público y privado, y fomentan el uso de los distintos modos de transporte disponibles, reduciendo el uso del automóvil.

Ciudades de diferentes países europeos y de Estados Unidos cuentan con gestión de estacionamientos y restricciones en cuanto al uso del automóvil, proveen información a los viajeros y tienen un transporte público eficiente que responde a un itinerario que se cumple cabalmente, este hecho facilita a los usuarios la planeación de sus recorridos.

Como complemento de un sistema de transporte público eficiente se debe de proporcionar información para que el viajero tenga conocimiento acerca de las opciones de rutas de las que puede hacer uso, ubicación de estacionamientos disponibles donde puede alternar modos de transporte (privado–público, público–privado o público–público) y tiempos de traslado, entre otros.

Sin embargo, esta información no se tiene en países en vías de desarrollo, tal es el caso de México, donde el transporte público no cuenta con itinerarios y el usuario no cuenta con elementos para estimar tiempos de espera para planear sus viajes.

En esta tesis se analiza el Centro Histórico de Coyoacán en el Distrito Federal, debido a que es una zona cultural importante dentro de la urbe central donde hay un gran desplazamiento de personas y se llevan a cabo actividades comerciales, sociales y culturales. En el análisis realizado se observó una serie de problemáticas en los cruces peatonales, falta de información del transporte público en la zona, estacionamientos y saturación de banquetas; todo esto afecta en conjunto a los residentes y a los visitantes que usan los diferentes modos de transporte de la zona. Es por este conjunto de características que el Centro de Coyoacán es un lugar adecuado para plantear acciones que ayuden a mejorar la movilidad y la imagen urbana.

El objetivo de esta tesis es crear una propuesta de mejoramiento del sistema de transporte público y privado del centro de Coyoacán, mediante la incorporación de una herramienta de software, un Sistema Avanzado de Información al Viajero (SAIV, ATIS por sus siglas en inglés Advance Traveller Information System), que ayudará al usuario a tomar mejores decisiones de viaje, facilitará el uso del transporte público, y permitirá realizar un uso racional del automóvil. Se propone que dicho sistema esté vinculado con un sistema de transporte sustentable, e integre las redes mono-modales de transporte en una red multi-modal, utilizando la infraestructura existente y teniendo como premisa que el usuario necesita información de los elementos que pueden mejorar la planeación de su viaje de tal manera que pueda aminorar su tiempo de viaje y hacer un mejor uso de la red de transporte.

En el primer capítulo se describen conceptos acerca del transporte a nivel urbano, la importancia que han tomado los modos de transporte alternativos y las zonas peatonales, y como estos últimos han mejorado la imagen urbana, ofreciendo una mejor integración de los distintos modos de transporte en las ciudades para propiciar un transporte sustentable. También se hace una descripción de los modos principales de transporte público y privado que existen en la Ciudad de México, y en particular en el centro de Coyoacán.

En el segundo capítulo se describen los Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT), donde se aborda el papel que han tomado las tecnologías de la información en la gestión del transporte, y los Sistemas Avanzados de Información al Viajero (SAIV) entre otros. Se presenta el estado del arte en los Sistemas Inteligentes de Transporte y su historia, como marco de referencia sobre su evolución. También se presentan aplicaciones de los SIT y cómo pueden integrarse con el transporte urbano, como el transporte público como el privado, para propiciar un transporte sustentable.

En el capítulo tres se explica la teoría de grafos e hiper-grafos, que es fundamental para poder diseñar correctamente las conexiones de la red, topología y las paradas del transporte público de la zona centro de Coyoacán; además se describen los algoritmos para la obtención de rutas e hiper-rutas. En este capítulo se presenta el algoritmo de Hiper-Rutas Viables Mínimas Para Redes Multimodales de Lozano & Storchi (2002), que será integrado en un SAIV en la propuesta para el mejoramiento de la movilidad.

El algoritmo de obtención de hiper-rutas mínimas viables en redes multimodales, es adaptado a la forma de operar del transporte público en el centro de Coyoacán. El algoritmo determina rutas multimodales más cortas que incluyen al transporte público y privado.

En el capítulo cuatro se explica la problemática encontrada en el centro de Coyoacán, se delimita la zona de estudio y se describen el proceso y los criterios para la digitalización de la hiper-red multimodal. Los modos de transporte existentes en la zona del centro de Coyoacán fueron integrados mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG). Una vez digitalizada la red se presenta un análisis de la configuración del transporte público y la red vial en el centro de Coyoacán, este análisis sirvió para definir la propuesta de transporte sustentable que se presenta en el capítulo seis.

En el capítulo cinco se explica el proceso de depuración de los datos de la tabla de atributos asociada a la red, que sirven para que el algoritmo de Hiper-Rutas Viables Mínimas para Redes Multimodales funcione adecuadamente; así mismo se describe el lenguaje de programación utilizado, las subrutinas que se programaron y la estructura de datos utilizada.

En el capítulo seis se presenta la propuesta de transporte sustentable para la zona centro de Coyoacán, donde se proponen la ubicación o generación de zonas peatonales, gestión de estacionamientos, la incorporación de mini autobuses eléctricos y la implementación del SAIV que se explica en el capítulo cinco.

Para demostrar el funcionamiento del SAIV, se presentan ejemplos de obtención de rutas en la red actual y en la red modificada bajo la propuesta de transporte sustentable, para el centro de Coyoacán. El SAIV incentivará el uso de la red de transporte multimodal.

Finalmente, se incluyen las conclusiones y las referencias, además de los anexos que contienen el código en lenguaje Java del programa del algoritmo de Hiper-Rutas Viables Mínimas para Redes Multimodales.

1. TRANSPORTE URBANO DE PASAJEROS

Este capítulo expone un marco de referencia del transporte urbano donde se describen los tipos de transporte que se suscitan en las urbes y da un enfoque al tipo de transporte existente en la Ciudad de México con el fin de poder realizar una comparativa, consiguiendo realizar un diagnóstico en la zona de estudio de Coyoacán.

1.1 Transporte urbano de pasajeros

El rápido crecimiento de las zonas urbanas, debido al desarrollo económico y crecimiento de la población ha generado crecimiento de la red vial, y de actividades sociales, culturales y económicas como el lugar de trabajo, las compras, el estudio, la recreación, el descanso, etc. (Thomson, 2001), estas actividades se llevan a cabo en distintos puntos de la ciudad, lo que ha incrementado diariamente los viajes generados dentro de las zonas urbanas; estas personas necesitan un medio de transporte así como los productos que se producen y consumen. Las zonas urbanas también son puntos generadores de viajes por lo que son necesarios sistemas de transporte urbano correctamente planeados para poder satisfacer la demanda que se genera diariamente.

Los sistemas de transporte urbanos son afectados por cada una de las actividades de la vida urbana, por lo cual existe una amplia variedad de disciplinas que están involucradas en su análisis y estudio, tales como ingeniería, sociología, urbanismo, economía y medioambiente (Levinson & Wean, 2007). El estudio de las diferentes disciplinas hace que el transporte sea un objeto de estudio muy amplio y complejo, por lo que debe analizarse sistemáticamente para poder tener una gestión del sistema de transporte integrado.

El transporte urbano se encuentra en transición como cambio modificador de aspectos económicos, sociales y ambientales, estos cambios afectan la manera de vivir de la población y los valores para evaluar las necesidades del transporte urbano (Levinson & Wean, 2007). Hoy día se debe hacer gran énfasis en la transición de construcción a gestión y mantenimiento de los sistemas de transporte existentes debido a la escasez de recursos y en cierta forma por la estabilidad de las ciudades.

Los mayores problemas del transporte han cambiado, en la actualidad se tiene el enfoque de equilibrar el aspecto económico (que anteriormente contaba con un gran peso), con la equidad social, conservación de la energía y el impacto ambiental; lo que ha denotado nuevas prioridades (BM, 1986). Se deben de adoptar nuevos paradigmas en la planeación e implementación de nuevas instalaciones y servicios de transporte. Para cumplir lo anteriormente dicho se deben

seguir las normas y regulaciones, el sector público debe tener la responsabilidad de la reglamentación y regulación del tráfico, planificación del transporte, asignación de normas de seguridad, y formulación de una política de transporte.

El creciente parque vehicular ha ocasionado que muchas ciudades padezcan de problemas graves con el flujo de vehículos, una de las principales razones es debido a que las ciudades son centros de actividad económica, social y cultural; lo cual provoca que la población se desplace hacia puntos focales dentro de las ciudades, propicia el congestionamiento vehicular y genera tiempos de traslado mayores afectando directamente la eficiencia económica de las ciudades y el bienestar de sus habitantes.

La causa fundamental de la congestión es la "fricción" que se da entre los vehículos en el flujo de tránsito. Hasta un cierto nivel de tránsito, los vehículos pueden circular a una velocidad relativamente libre, que es determinada por los límites de velocidad y la frecuencia de las intersecciones, entre otras. A volúmenes mayores, cada vehículo adicional en la vialidad estorba el desplazamiento de los demás, es decir, comienza el fenómeno de la congestión. Entonces, una posible definición objetiva es: "La congestión es la condición que prevalece si la introducción de un vehículo en un flujo de tránsito aumenta el tiempo de circulación de los demás" (Thomson, 2001).

Por lo tanto, el número creciente de vehículos en las grandes ciudades es uno de los factores que ha generado un incremento gradual de la congestión. La **congestión** es el resultado de los desplazamientos simultáneos que realiza la población durante los mismos periodos de tiempo. Tiene un impacto sobre la vida cotidiana de la gente quien invierte gran parte de su tiempo solo para desplazarse y repercute en pérdida de oportunidad para realizar otras actividades recreativas o económicas lo cual genera un costo debido al desplazamiento (Bull, 2003).

El rápido crecimiento de las zonas urbanas ha ocasionado un aumento explosivo del uso del automóvil debido al poder adquisitivo de las clases de ingresos medios, mayor acceso a créditos, mayor oferta de autos usados, mayor crecimiento de la población, menor número de habitantes por vivienda y escasa aplicación de políticas estructuradas en el transporte urbano (Thomson, 2001). El aumento vehicular deriva en una serie de problemáticas como congestión vehicular, contaminación del aire, generación de ruido, invasión de la tranquilidad e incremento de accidentes viales.

El transporte urbano se conforma por el transporte vehicular privado, el transporte público de pasajeros y el transporte de carga, entre los más importantes que interactúan cotidianamente en las ciudades. Se puede clasificar el transporte público y privado de manera muy generalizada como se indica en el esquema de la Figura 1-1; ruta libre indica que el vehículo puede alterar su ruta a voluntad del conductor, haciendo uso de la red vial y ruta fija indica que la ruta está limitada a una infraestructura (rieles o carril confinado).

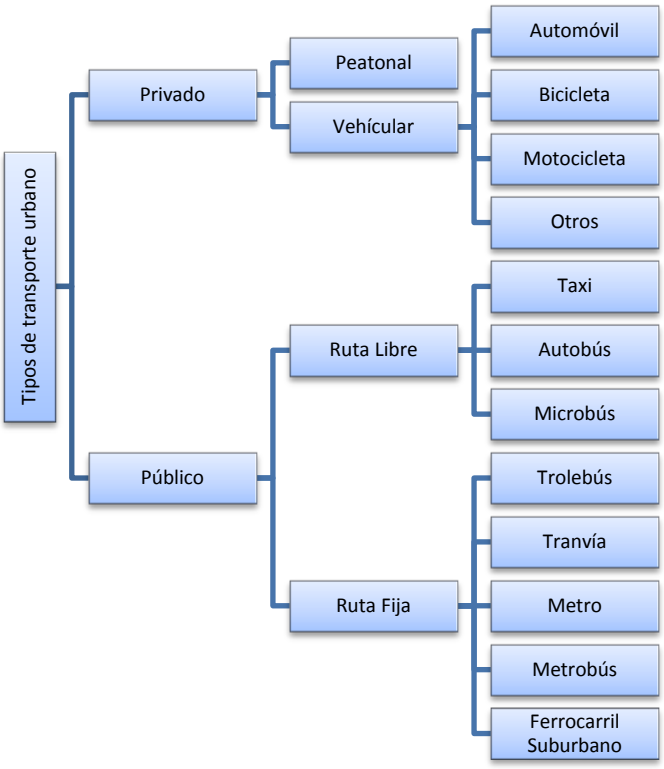


Figura 1-1 Clasificación de transporte urbano (Elaboración propia con base a clasificación presentada por Thomson, 2001).

1.1.1 Tráfico vehicular

El tráfico vehicular lo define Lozano, et al (2003) como el flujo vehicular producido en un momento y lugar determinados, como serie de decisiones individuales tomadas por los usuarios de la red (Lozano, et al., 2003). Se puede entender que cada usuario elige el modo de transporte, cuándo ocuparlo y la ruta que desea; estas decisiones se ven determinadas por el costo, el tiempo, la seguridad, la comodidad y las vialidades disponibles o de conocimiento del usuario.

Es fácilmente reconocible que la mayor parte del tráfico corresponde al uso del automóvil privado, ya que de datos obtenidos del Banco Mundial (BM) el 75% de los vehículos son automóviles particulares que solo transportan al 25% de todos los viajeros.

El uso del automóvil se ha incrementado gradualmente durante el siglo XX y deben de buscarse soluciones aplicando políticas restrictivas, que pueden apoyarse en el uso de las últimas tecnologías aplicables para mejorar el transporte público, la integración urbana y el uso de diferentes tipos de transporte, entre otras para desalentar y disminuir el parque vial.

1.1.2 Transporte Público Masivo

El transporte público ha sido y será necesario debido al rápido crecimiento de la demanda en las zonas urbanas para atender a los usuarios que necesiten trasladarse y así reducir los niveles de congestión vehicular con la consecuente disminución de impactos medioambientales.

A continuación se presentan los principales sistemas de transporte público:

- Red de autobuses: Es la forma más barata y flexible de satisfacer la amplia gama de la demanda en toda la ciudad. Mediante carriles exclusivos en las vías de tráfico muy denso se logra satisfacer las más intensas demandas
- Sistemas de transporte de trenes ligeros: Van desde los tranvías que circulan en las calles hasta los sistemas de alto costo como los ferrocarriles semi-Metro que circulan en vías exclusivas. Es menos flexible para satisfacer las altas demandas.
- Sistema de transporte tren rápido: Denominados como Metro y tren subterráneo, ofrecen la máxima capacidad y mayor velocidad. Demandan altísimos costos de construcción y tecnología avanzada fuera del alcance de algunas economías.

Debido a que algunas ciudades experimentan un rápido crecimiento e incertidumbres futuras, es recomendable crear un enfoque de planeación a largo plazo para la implementación de alguno de estos sistemas de transporte.

1.1.3 Transporte de carga

El transporte de carga es complejo y heterogéneo debido a que es difícil identificar características comunes entre diferentes demandantes, diferentes mercancías y diferentes vehículos (Antún, et al., 2005). En esta diversidad de características se involucra si el tipo de transporte es para recorridos largos o reparto local y abre un panorama amplio hacia las implicaciones del transporte de carga en zonas urbanas.

Todos los dias, diferentes tipos de transporte interactuan en las diferentes vialidades de las ciudades y contribuyen a la congestion vehicular, entre ellos se encuentran el automovil particular, el transporte público y el transporte de carga; en este ultimo se encuentra el transporte de distribucion urbana de mercancias.

Antún (2013), menciona que la distribución urbana de mercancías es crucial para el movimiento económico de la ciudad y el bienestar de sus habitantes, ya que influye directamente en la congestión, contaminación, consumo energético, seguridad vial y ocupación del espacio urbano. La congestión vehicular afecta a los siguientes actores:

- Los oferentes del servicio (transportistas y operadores logísticos)
- Los demandantes (generadores de carga)
- Las autoridades locales y los usuarios de la vía pública.

El mismo autor menciona que existe una caracterización de la distribución urbana de mercancías en la cual se encentran tres aspectos principales que caracterizan y condicionan la distribución urbana de mercancías:

- La influencia de la infraestructura, por ejemplo calles cortadas, calles con sentido único, semáforos, etc.
- La estrategia de la distribución, por ejemplo el número de destinos a cubrir, los tiempos de espera y de descarga, los horarios de recepción de mercancía, etc.
- Las características de los vehículos, que deben adaptarse a las condiciones de infraestructura y a las estrategias de distribución; el tamaño del vehículo está limitado por la anchura de las calles, las zonas de carga y descarga deben tener un fácil acceso.

De acuerdo con Muñuzuri, et al., (2002), se puede encontrar dentro del contexto de la distribución de mercancías a los diferentes implicados que afectan el comportamiento del flujo vehicular que se mencionan a continuación.

- *Transportistas*: Compañías o autónomos que transportan carga dentro de la ciudad y empresas de carga fraccionada.
- *Receptores*: Empresas locales, y fundamentalmente el comercio.
- *Residentes*: Personas que habitan las zonas urbanas y que se ven afectadas por cualquier plan de logística urbana, debido a su interacción con el tráfico general y con la calidad de vida en la zona.
- *Administración*: La autoridad local, encargada de seleccionar e implantar planes de logística urbana de mercancías, mediando entre los intereses de los demás grupos.
- *Externos*: Aquellas personas que, por razones de compras, trabajo u ocio, acceden a la zona urbana considerada de forma diaria o esporádica.

El comportamiento vehicular está sujeto a otras variables como accidentes, días feriados o clima que afectan el comportamiento del flujo por lo que se debe de considerar una planeación logística para amortiguar o en su caso solucionar la gran problemática que se encuentra en centros urbanos mediante aplicación de reparto en conjunto, SIT, gestión de ventanas temporales y vías de carga y descarga de mercancías.

1.2 Transporte Sustentable

El transporte genera diferentes externalidades que afectan el medio ambiente por lo que desde los años ochenta se han planteado políticas para mitigarlas, se tratan aspectos como uso de suelo, cambio climático global, degradación de la capa de ozono, conservación de la biodiversidad existente, población, etc. Una solución factible es la aplicación del concepto de trasporte sustentable, el cual cuida aspectos como la contaminación ambiental, economía interinstitucional, y aspectos sociales los cuales son afectados debido a la saturación del transporte en sus diferentes modalidades.

En la actualidad el desarrollo sustentable ha sido punto focal en el lenguaje común, el cual busca una estabilidad entre aspectos económicos, sociales y prioridades medioambientales. Es necesario este cambio fundamental debido a los cambios medioambientales globales. Banister (2005) menciona que anteriormente en la realización de proyectos se tenía un enfoque hacia el crecimiento económico el cual era prioritario, se ha observado que este esquema ya no es suficiente por lo que se requiere hacer un balance entre el conjunto económico y otros componentes del desarrollo.

En las vialidades urbanas se involucran transporte público, espacio público para realización de distintas actividades sociales, espacios peatonales y construcciones aledañas, por lo que se observa un gran intercambio cultural (Button & Hensher, 2001). Por tal razón, se deben de analizar las diferentes variables que influyen dentro de un área delimitada de manera sistémica para beneficiar a los distintos involucrados, consiguiendo así un mejor uso de vialidades.

Las calles de la ciudad pueden ser ocupadas por vehículos automotores, bicicletas y de uso peatonal en casos limitados, por ejemplo para cruces peatonales y por las banquetas pueden transitar peatones y vehículos de tracción humana. En la Tabla 1-1 se muestra a más detalle los distintos tipos de vehículos motorizados y no motorizados que puede haber en una zona urbana.

Tabla 1-1 Espectro posible para reconocimiento de modo/usuario de la vía urbana (Button & Hensher, 2001).

Clase	Modo o usuario
Peatones	Caminar
Vehículos montados y/o de tracción humana	Bicicleta Patín del diablo Bici taxis / Triciclos Patineta Patines Silla de ruedas
Vehículos automotores	Vehículos particulares Vehículos de transporte público Taxi Vehículos de mercancías Vehículos de carga Otros

En la actualidad muchas calles no cumplen con su máxima eficiencia ya que existe el alto volumen de vehículos e interactúan varios modos de transporte sobre una sola vialidad y reducen los tiempos de recorrido por lo que se ven afectadas las actividades económicas, culturales y sociales en la ciudad.

Es necesaria una gestión adecuada de los diferentes modos de transporte y determinar prioridades considerando a los diferentes usuarios que se involucran en la vía pública para posteriormente conectar de una manera integral los distintos modos de transporte existentes para propiciar un transporte sustentable.

Para fomentar un transporte sustentable debe existir una jerarquización de los modos de transporte en la cual se pueden denotar las necesidades del área como necesidades básicas, equidad, eficiencia y cuidado del medio ambiente (Button & Hensher, 2001). En la Tabla 1-2 se presenta como ejemplo una jerarquía de modos de transporte, en la cual puede observarse que el uso de automóvil privado se encuentra en el último nivel, por lo que se da mayor relevancia al peatón y al transporte público.

Tabla 1-2 Jerarquización del uso de la vía pública (Button & Hensher, 2001)

Nivel	Usuario preferente
1)	Servicios de emergencia
2)	Peatones
3)	Discapacitados
4)	Ciclistas
5)	Usuarios de transporte público
6)	Conductores de vehículos de entrega
7)	Operadores de servicios públicos
8)	Taxis
9)	Automóviles privados

1.2.1 Tendencias del Transporte Sustentable

El uso cada vez mayor del automóvil repercute en altos costos económicos, ambientales, movilidad e imagen urbana a la sociedad, si bien es un modo de transporte “puerta a puerta” no está integrado de manera adecuada con los otros modos de transporte público como caminar, uso de bicicleta y transporte público entre los más importantes para realizar cambios modales y tener el mejor uso las áreas urbanas.

Buehler et al. (2009), en su trabajo Making Transportation Sustainable: Insights from Germany, aborda el proceso y técnicas para llegar a un transporte sustentable, así como se ha dado en ciudades de Alemania, donde se han tenido buenos resultados. Menciona que para llegar a un transporte sustentable no basta la mejora de combustibles y crear autos más eficientes, sino que es necesario crear políticas y realizar cambios en nuestro comportamiento como viajeros, para esto se necesita que el tránsito vehicular, peatonal y uso de bicicletas esté integrado y funcione armónicamente de acuerdo al uso de suelo de la zona. El transporte público es más exitoso en Alemania no porque se le destinen más subsidios, sino por mejor manejo de tarifas, políticas de servicio, sistemas integrados de transporte público y mayor costo por uso del automóvil.

1.2.2 Caminar

Mejor denominado en el ámbito del transporte como modo peatonal, caminar consiste en moverse a pie, desplazarse andando para practicar ejercicio o simplemente por placer.

Los modos de transporte peatonal y bicicleta proveen salud pública, sustentabilidad, eficiencia de energía, reduce el cambio climático, promueve el turismo y desarrollo económico (Fisher, et al., 2010). Deben existir políticas que favorezcan al peatón y educación por parte de los automovilistas y ciclistas para respetar zonas destinadas para el peatón.

Las zonas peatonales normalmente cubren zonas estrechas y con un gran flujo o densidad de peatones de aproximadamente entre 100 a 300 metros. Existen ciudades como Múnich y Hanover donde las redes peatonales se extienden de 4 a hasta 7 km (US-DOT, 1994).

La ciudad de Stroget en Copenhague cuenta con una de las zonas para compras peatonales libres de automóviles en Europa, la cual es inspiración para muchas otras calles peatonales (Figura 1-2).

Figura 1-2 Antes y después en Stroget, Copenhague (Fisher, et al., 2010)

Este tipo de propuestas han sido aplicadas en diferentes partes del mundo debido a su aceptación y éxito tanto comercial como socialmente hablando, ya que aumentan el turismo y generan beneficios al medioambiente y la imagen urbana. Otro ejemplo de este tipo de propuestas es el corredor peatonal de Madero y Regina en el Centro Histórico de la Ciudad de México.

1.2.3 Bicicleta

Un modo de transporte alternativo es el uso de la bicicleta, en la que se pueden alcanzar velocidades de hasta 30 Km/hr (Figura 1-3). A este modo de transporte se le ha dado mayor relevancia en Europa, principalmente en Alemania donde se inculca educación del uso de bicicletas así como las reglas de tráfico a niños y jóvenes, los conductores deben de saber los derechos que tienen los ciclistas y los peatones (Buehler, et al., 2009), en ciudades de Alemania se ha creado una cultura donde se concientiza a la población desde temprana edad a utilizar modos de transporte alternativos y cuentan con políticas establecidas para su uso.

Figura 1-3 Ruta de un solo sentido en Berlín, Alemania (Fisher, et al., 2010)

De acuerdo con Medina & Jimena (2012), para la adecuación de la infraestructura para fomentar el modo bicicleta, se deben cuidar los siguientes elementos.

- Infraestructura para uso exclusivo del ciclista.
- Vialidades de uso compartido con el automóvil.
- Bici-estacionamientos.
- Acondicionamiento de infraestructura en cruces y señalamientos.
- Sistemas de préstamo o renta de bicicleta.

Una correcta implementación de estos elementos y un sistema de información puede crear una integración adecuada con otros modos de transporte.

1.2.4 Integración entre caminar y bicicleta

Entre cualquier cambio modal se presenta el modo caminar, en este caso debe haber integración entre caminar y el modo bici por lo que debe haber consideraciones del transporte público y son necesarias estaciones intermodales en las cuales exista la facilidad de dejar estacionada la bicicleta o tener servicio de renta de bicicleta.

Algunas consideraciones que presenta Fischer (2010) que se deben cuidar son las siguientes:

- Variedad de estaciones de estacionamiento para bicicletas, de preferencia con estantes, y lugares cerrados para mayor seguridad (Figura 1-4).
- Políticas que permitan transportar bicicletas en transportes públicos, incluso durante horas pico.
- Renta de bicicletas a bajo costo o servicio gratuito por tiempos cortos de uso, ubicados cerca de estaciones de trenes o estaciones de autobuses con aprobación de la propia agencia de transporte.
- Canales o rampas en escaleras que faciliten usar escalones (sea el caso) cuando se carga la bicicleta.

- Taxis con compartimentos de montaje rápido para bicicletas.

Figura 1-4 Estación de bicicletas. (Fisher, et al., 2010)

1.2.5 Restricción de automóviles

Se tienen registro de implementaciones de restricción de vehículos automotores en zonas centro de ciudades urbanas en ciudades alemanas desde a mediados de los ochentas con buenos resultados, la primera conocida se documenta en Alemania donde las áreas de compras del centro de la ciudad se convirtieron en zonas peatonales, sin acceso a vehículos automotores.

En Holanda se implementó por primera vez el “tráfico calmado” (traffic-calmed) para zonas residenciales con “woonerf” o “living yard” (US-DOT, 1994). Woonerf es un término holandés utilizado para indicar que una determinada área es compartida para peatones, ciclistas y automovilistas con velocidad muy reducida debido a la colocación de árboles, vegetación, áreas para estacionarse y diferentes obstáculos en la calle (US-DOT, 2004). Esta propuesta se ha hecho muy popular porque reduce accidentes, ruido y tráfico en la zona donde se implementa. Estas zonas están delimitadas por señalización horizontal como se puede observar en la Figura 1-5.

Figura 1-5 Calle residencial en Bern, Suiza con "tráfico calmado" (Fisher, et al., 2010)

Posteriormente en Europa se utilizó el concepto con las “Celdas de Tráfico” (Traffic Cells), se han implementado en varios países alrededor del mundo como Gothenburg, Suecia y Nagoya, Japón.

El “Tráfico Calmado” fue utilizado inicialmente para zonas residenciales pero actualmente se aplica a una gran cantidad de ciudades el cual puede ser utilizado en conjunto con diferentes modos de transporte (zonas peatonales, ciclistas, transporte público y transporte privado) y coexistan armónicamente el área urbana y las vialidades para salvaguardar el medioambiente y centros históricos.

Fisher (2010) menciona algunos de los beneficios del “Tráfico Calmado” los cuales se presentan a continuación:

- Mejoras para el tráfico y la seguridad
- Libre uso del centro, especialmente para cada uso.
- Atraer a los compradores/visitantes de los alrededores
- Menos ruido y contaminación
- Preservación del paisaje urbano de las localidades céntricas
- Prevención de pérdidas de comercio entre las ciudades competidoras

Las Celdas de Tráfico consisten en limitar el número de vehículos que puedan entrar en determinadas zonas urbanas, esto se puede conseguir restringiendo la velocidad de circulación por debajo de los 30 km/hr o incluso restringiendo totalmente el cruce de vehículos (Nuworsoo & Cushing, 2012). El uso de las “Celdas de tráfico” fortalece el uso de modos de transporte no motorizados como el modo peatonal y el modo bici, y limita el uso de transporte público en zonas no autorizadas.

La popularidad del concepto de celdas de tráfico, su impacto a la sociedad y las políticas de resguardo del medio ambiente ha hecho trascender su aplicación del Norte de Europa a Japón, Australia y a Estados Unidos donde ya se han tenido resultados favorables en Palo Alto, California y Seattle por mencionar algunas.

Buehler (2009) presenta esta serie de recomendaciones que se deben de seguir para poder planear un sistema de transporte sustentable**.**

1. Asignar tarifas adecuadas para fomentar el uso de coches menos contaminantes, no manejar en horas pico, y mayor uso de transporte público.
2. Integrar el transporte vehicular, peatonal y bicis como alternativas viables al uso del automóvil como una medida necesaria para crear restricciones a automóviles y que sean políticamente viables.
3. Completa coordinación y planeación integrada para uso de suelo y transporte para desalentar el crecimiento del uso independiente del automóvil y promover el desarrollo del tránsito orientado.
4. Información pública y educación cívica para crear cambios esenciales en la transmisión de beneficios y fortalecer resultados a largo plazo.

5. Implementar políticas por etapas con una perspectiva a largo plazo. Es necesario un tiempo considerable para obtener el apoyo público y político.

Con esta serie de recomendaciones se puede planear el desarrollo del transporte sustentable, esta planeación como ya se ha mencionado, debe ser considerada a largo plazo ya que se necesita una gran cultura y educación por parte de la ciudadanía. En la Tabla 1-3 se resume una serie de estrategias que han implementado diversos países europeos para la promoción del transporte sustentable.

Tabla 1-3 Estrategias abordadas para implantación de Sistemas de Transporte Sustentable (Buehler, et al., 2009)

Categoría	Estrategia de acción
Políticas Federales	- Subsidios federales y regulaciones
Instalaciones peatonales y para bicis	- Zonas libres de autos - Tráfico calmado - Zonas Peatonales - Redes de rutas ciclistas
Seguridad, educación y fortalecimiento	- Educación de tráfico - Fortalecimiento de derechos de los peatones y ciclistas.

En diferentes ciudades como Singapur, Bergen, Oslo Roma y Londres, han aplicado el “Toll Ring” el cual hace uso de peajes urbanos para la reducción del tráfico de automóviles en los centros urbanos de sus respectivas ciudades.

El “Toll Ring” tiene distintos objetivos dependiendo de la ciudad donde se aplica, de acuerdo con Pozueta (2008), los peajes urbanos se articulan en torno a dos metas principales, la reducción de la congestión vial y el financiamiento de nuevas infraestructuras viales, con metas de calidad ambiental y mejora de los medios de transporte alternativos a los vehículos privados, en particular, el transporte público.

Se ha observado que con la implementación de “Toll Ring”, el uso del transporte público ha aumentado un 10% y la velocidad en las zonas restringidas también ha aumentado, por lo que se ha disminuido la congestión (Pozueta, 2008). En la Tabla 1-4 se muestran algunos de los objetivos conseguidos con el Toll Ring.

Tabla 1-4 Objetivos explícitos de los principales implementaciones del Toll Ring (Pozueta, 2008).

Ciudad	Objetivo del peaje urbano
Singapur (1975)	Reducir la congestión vial.
Roma (1989)	Reducir el tráfico en el centro para evitar su deterioro.
Durham (2002)	Reducir el tráfico en la calle de la Catedral.
Londres(2003)	Reducir la congestión. Mejorar el transporte público en autobús Mejorar la fiabilidad para los usuarios de automóviles. Hacer más eficiente la distribución de mercancías y servicios.
Estocolmo (2006)	Reducir la congestión. Mejorar la accesibilidad. Mejorar el medio ambiente.

Para fomentar el transporte sustentable, se hace uso de los Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT) mediante los cuales se puede informar a los usuarios de las alternativas de las que puede disponer cuando realice un viaje. Se presentan algunos ejemplos como el sistema de planeación de rutas en Copenhague en el punto 1.2.6, y en el capítulo 2 se habla a mayor detalle de los SIT mencionando algunas de sus aplicaciones.

1.2.6 Ejemplos de aplicaciones de transporte sustentable

En los últimos diez años ha habido un desarrollo de transporte sustentable en diferentes regiones del mundo, principalmente en Europa, Japón y Australia, donde se han implementado distintas acciones que se presentan a continuación.

La iniciativa CIVITAS es un proyecto promovido por la Unión Europea que pretende apoyar y evaluar nuevas estrategias de transporte urbano sustentable integradas, que deberían contribuir a mejorar considerablemente el bienestar de los ciudadanos europeos. CIVITAS, ha trabajado con diferentes ciudades para ofrecer un sistema de transporte sustentable, implementando las últimas tecnologías integradas con implementación de políticas en el campo de energía y transporte para construir mercados de innovación, ha participado en proyectos de 25 ciudades de Europa (CIVITAS, 2012).

En varias ciudades de Europa (París, Ámsterdam, Brúcelas y Copenhague) se ha implementado un servicio electrónico para renta de bicicletas, por ejemplo, el sistema “Velib” (Figura 1-6), es un sistema de autoservicio implementado en París que ofrece miles de bicicletas distribuidas en diferentes estaciones y se ha adaptado una ruta ciclista que opera las 24 horas al día. La renta de la bicicleta es compatible con tarjetas bancarias o tarjetas con chip requeridas en la estación donde se renta la bicicleta (Nuworsoo & Cushing, 2012).

Figura 1-6 Estación de servicio Velib (Nuworsoo & Cushing, 2012)

En Montreal es utilizado el "The Bixi system" que fue lanzado en el 2009 es usado actualmente en **Ottawa – Gatineau**, **Boston, Washington, Arlington, Minneapolis, Melboirne y Londres** (PBSC Urban Solutions, 2012). Cuenta con una estación de pago, espacios para alojar las bicicletas..

Los sistemas Velib y Bixi System tienen un funcionamiento similar de operación que buscan el mismo objetivo pero implementados por diferentes empresas.

La renta de bicicletas implementa mejoras a las vialidades, delimitando espacios para la circulación de peatones, bicicletas y vehículos como se puede observar en los siguientes ejemplos.

En **Copenhague, Dinamarca** que tiene una población de 5' 584,758 habitantes al 2012, desarrolla una red de autopistas para bicicletas con varias rutas (Figura 1-7), esta red cuenta con estaciones de mantenimiento, rutas sin desviaciones, rutas amplias para soportar a ciclistas a altas velocidades y bajas velocidades. La ciudad aplica políticas de tráfico las cuales priorizan al ciclista al momento de cruzar cruces carreteros (Nuworsoo & Cushing, 2012).

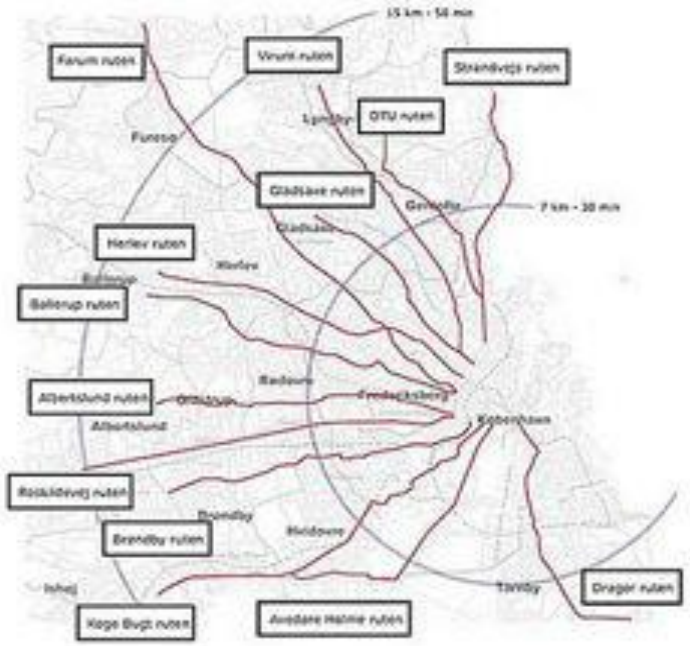


Figura 1-7 Mapa red de autopistas para bicicletas en Copenhague (Nuworsoo & Cushing, 2012)

La ciudad de Copenhague también cuenta con un sistema alojado en página web como se muestra en la Figura 1-8, ofrece información al público en general para planear las rutas dependiendo de las preferencias de cada usuario (Ruta verde, ruta más corta, ruta segura, ruta tranquila).

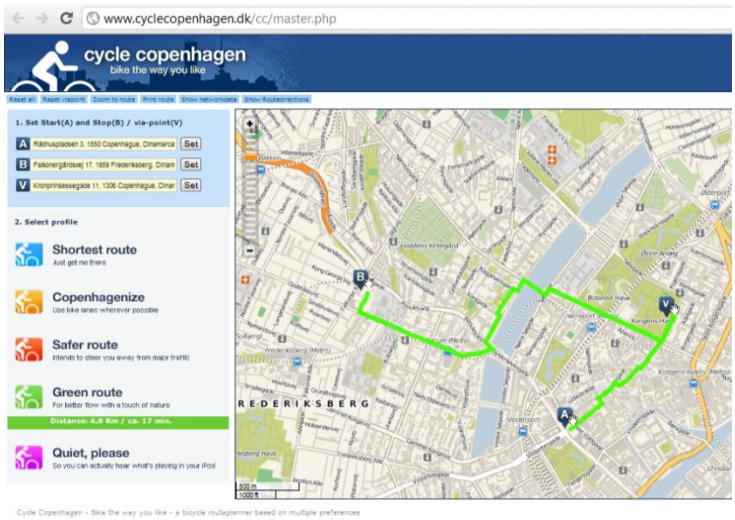


Figura 1-8 Sistema de planeación de rutas "Cycle copenhague" (Haunstrup , 2012)

En la ciudad de **Ghent, Bélgica** que cuenta con una población de 247,486 habitantes, ha desarrollado una política de integración de ciclo-vías y paseos peatonales en la ciudad debido a que en los años noventa presentaba un grave problema de congestión vehicular, lo cual mejoro la imagen urbana de la ciudad, la contaminación ambiental y los problemas de tráfico. Más de dos tercios de los 65,000 estudiantes usan bicicleta para moverse cada día, un uso menor del automóvil privado genera mayor uso de bicicletas y transporte público (Figura 1-9 y Figura 1-10).

Figura 1-9 Antes y después de implementación de paseos peatonales en la ciudad de Ghent, Bélgica (CIVITAS, 2012)

Figura 1-10 Antes y después de implementación de zona peatonal en centros históricos en la ciudad de Ghent, Bélgica (CIVITAS, 2012)

Esta ciudad también cuenta con servicio multimodal integrando el uso de la bicicleta (Figura 1-11), mediante estaciones de renta y estacionamiento cerca de estaciones de autobuses, para poder realizar una transferencia modal. Los habitantes tienen a su disposición redes viales para bicicletas, así como un sistema que permite obtener rutas ciclistas disponibles a través de internet.

Figura 1-11 Uso de bicicletas en Ghent, Bélgica (CIVITAS, 2012)

Otro gran ejemplo es la ciudad de Roma, Italia que tiene una población de 2, 796,102 habitantes, donde funciona un sistema de autobuses eléctricos para transporte púbico, los cuales conectan de muy buena manera el centro de la ciudad con las rutas de autobús y el sistema Metro. Cuenta con la particularidad de que las líneas de este servicio solo operan fines de semana o días festivos dependiendo de la cantidad de visitas que se realicen en la zona (Figura 1-12). Los autobuses eléctricos ofrecen un servicio de acuerdo al siguiente itinerario:

- Línea verde – Opera a diario
- Línea verde agua – Opera fines de semana por la tarde
- Línea azul Opera solo fines de semana
- Línea Roja – Opera a diario

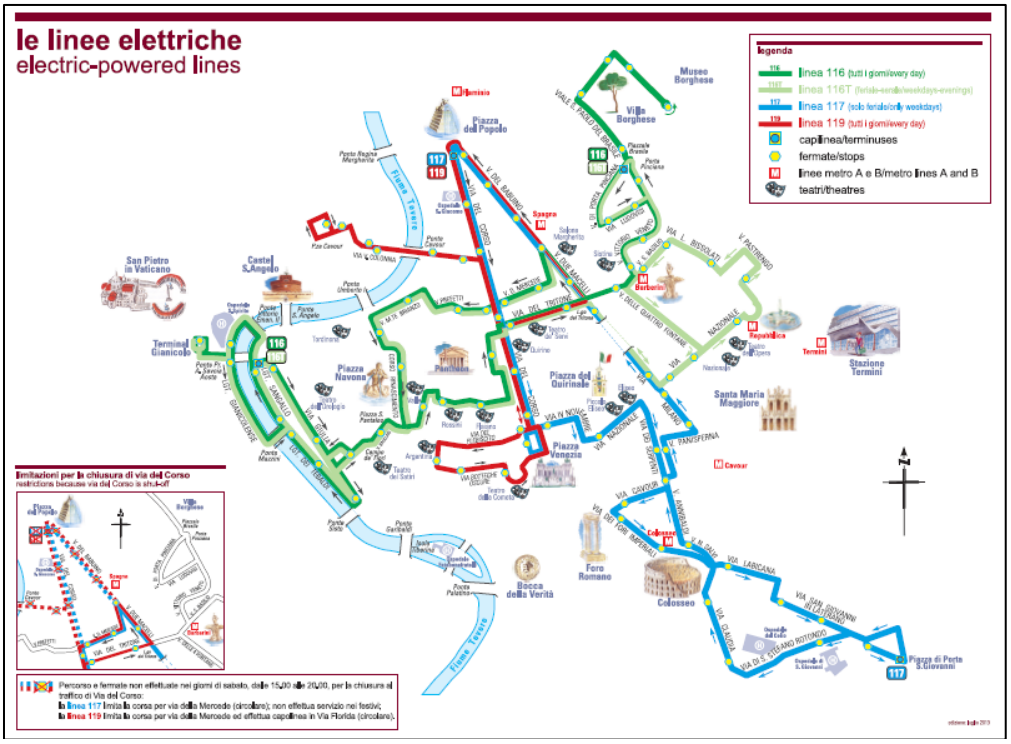


Figura 1-12 Líneas de buses eléctricos en Roma (atac, 2013).

En las paradas se puede encontrar un módulo con información acerca de la llegada de los autobuses, estos autobuses a su vez cuentan con un GPS (Global Positioning Systems) para que el centro de operación pueda monitorearlos y ofrecer información de su ubicación. Este transporte cuenta con la ventaja de que son pequeños, se acoplan a las calles estrechas de roma, son utilizados principalmente para viajes cortos y cómo funcionan como enlace entre otros modos de transporte.

En la página web de "atac" se ofrece información al usuario que permite planear observar las rutas disponibles a los viajeros (Figura 1-13).

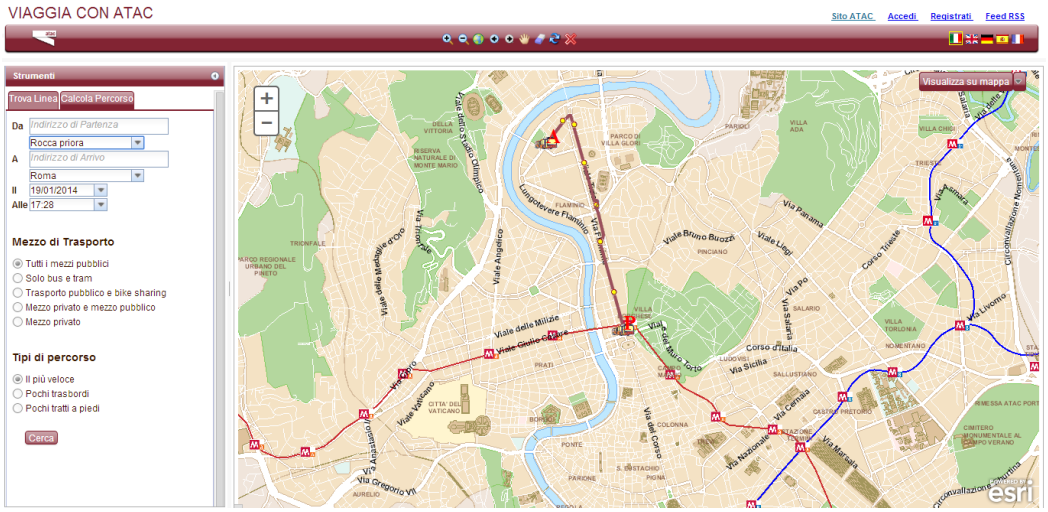


Figura 1-13 Obtención de ruta en el servicio de transporte público en Roma (atac, 2013).

Las tarifas que se manejan en la red de autobuses electico de la ciudad de Roma incluyen servicios combinados, los precios del Bus de Roma son:

- B.I.T. € 1.50. Ticket estándar, valido para un viaje en Metro o 75 minutos en todos los buses
- B.I.G. € 6.00. Ticket diario, valido para Metro ilimitado, bus y tranvía dentro de roma
- B.T.I. €16.50. Ticket de turista por 3 días, Valido para todos los servicios impresos en el ticket.
- C.I.S. €24.00. Ticket semanal
- El transporte es gratis para niños menores de 10 años.

Los ejemplos que se presentaron, son solo algunos casos de aplicaciones que han tenido éxito, los cuales han beneficiado a las ciudades donde han sido implementadas aunque existen más casos documentados. Estas aplicaciones de transporte sustentable pueden mejorarse o combinarse para resolver un problema en específico que tenga cada ciudad donde quiera ser implementado, integrando los modos de transporte que tenga y respetando una estricta aplicación de políticas.

1.3 Transporte de pasajeros en la Cd. de México

En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM, comprende las 16 Delegaciones del Distrito Federal, así como 49 de los 59 municipios del Estado de México que forman parte de la Zona del Valle de México) se realizan 21.9 millones de viajes a lo largo de un día, de donde el 58.4% se originan el Distrito federal y 41.3 en municipios del estado de México (INEGI, 2007). De estos viajes, en el Distrito Federal las delegaciones con mayor cantidad de viajes producidos y atraídos son Iztapalapa con 1.8 millones, Gustavo A. Madero con 1.4 millones y Coyoacán con 1.1 millones.

En la Ciudad de México existe una gran captación de tráfico vehicular, los modos de transporte que son utilizados se presentan en la Tabla 1-5, y posteriormente se describirán a mayor detalle.

Tabla 1-5 Modos de transporte en la ZMVM (INEGI, 2007)

Tipo de Transporte	Modo de Transporte	Costo
Público	Metro Tren Ligero Metrobús Trolebús Autobús RTP Autobús Suburbano Colectivo Taxi	Pasaje
Privado	Automóvil Motocicleta Bicicleta	Combustible, Estacionamiento
Otro	Autobús Foráneo Transporte Escolar Transporte personal Pumabús	Pasaje

1.3.1 Automóvil

El automóvil es el modo de transporte más utilizado, cuenta con el 41.5% del parque vehicular, lo que se traduce en 6.2 millones de viajes en un solo modo realizados en la ZMVM (INEGI, 2007). Es el modo de transporte por excelencia, como describe Valero Calvete (1970), debido a sus características físicas y ser individualizado por:

- Conducción Libre
- Autonomía y libertad de movimiento
- Reducido número de pasajeros. Teóricamente el número de plazas es de cuatro a seis pero en la práctica es de uno a tres.
- Requiere una superficie "muerta" en reposo (estacionamiento).

Existe una gran demanda de uso de automóvil el cual es subutilizado porque son ocupados debajo de la capacidad media, transportando a una persona por vehículo, lo cual provoca que existan más automóviles usando la vialidad, lo que genera mala calidad del aire. Los automóviles generan ventajas al conductor y a la sociedad por conceptos de derrama económica (valor agregado, empleo, comercio, etc.). Sin embargo, el crecimiento del parque vehicular ha venido acompañado de impactos negativos ambientales, económicos, urbanos y sociales que reducen las ventajas (externalidades positivas) de vivir en las ciudades.

El uso de automóvil en las ciudades genera la necesidad de estacionamientos. En la Ciudad de México existe uso gratuito del espacio público como estacionamiento en gran parte de la ciudad salvo algunas excepciones, lo cual incentiva la utilización del automóvil y crea diversos problemas como conducir lentamente al buscar un espacio de estacionamiento, que genera pérdida de tiempo de otras personas, ruido, estrés y contaminación. Existen áreas urbanas que han implementado el uso de parquímetros para recaudar una tarifa por el uso del espacio público.

El Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo (ITDP, por sus siglas en inglés), que es un organismo internacional sin fines de lucro que promueve el transporte sustentable y equitativo a nivel global y que cuenta con oficinas en México, menciona que él el 30% de la superficie de rodamiento en el Distrito Federal es ocupada por automóviles para estacionamiento y el 39% de los estacionamientos se encuentran en la calle, lo cual tiene un gran impacto en la imagen urbana.

1.3.2 Taxi

Los taxis cuentan con el 8.8% de los viajes en un solo modo de transporte (INEGI, 2007), puede considerarse como uso del automóvil ya que cuenta con el mismo número de plazas y comparte característica similares. Hace uso de un "taxímetro" para asignar una tarifa dependiendo del trayecto recorrido o tipo de ocupación.

Se puede encontrar dos casos, taxi libre o taxi de sitio. El taxi libre no necesita de estacionamiento ya que se encuentra en constante movimiento lo que genera un mayor uso de combustible y

contaminación al medio ambiente al igual que ocupación de la red vial y “taxi de sitio” puede tener base en un sitio público o con base en terminales de autobuses foráneos, CETRAM (Centro de Transferencia Modal) o aeropuertos (SETRAVI-GDF, 2012). En ambos casos, el taxi hace uso de áreas de la superficie de rodamiento, lo cual puede generar congestión vehicular en las vialidades.

1.3.3 Autobuses y microbuses

La Ciudad de México cuenta con una variedad de vehículos de transporte público de pasajeros que tienen diversas características, se pueden encontrar:

- Furgonetas, con hasta 18 asientos.
- Camioneta Volkswagen (combis), con hasta 13 asientos.
- Microbuses, con hasta 40 asientos.
- Autobuses, hasta 50 asientos.

Cada uno de estos vehículos puede ampliar su capacidad total partiendo de la hipótesis de que los vehículos pueden ser modificados.

El autobús puede considerarse como la culminación técnica de los diversos medios de transporte de masas no ferroviarios. La ZMVM cuenta con un uso de autobús del 34.6% en un solo modo de viaje, la cual sigue al modo de transporte del automóvil, lo cual la convierte en el modo de transporte público de pasajeros más utilizado (INEGI, 2007).

Una de sus características principales es que son un medio de transporte de conducción libre con elevado rendimiento, en cuanto a relación de viajeros/superficie ocupada. Sort (2006) hace referencia a que el tipo de vehículo se acopla directamente a la zona a la que brinda el servicio, por ejemplo los microbuses o combis son orientadas a la población de barrios pobres que cuentan con callejuelas estrechas y de gran pendiente donde no pueden acceder camiones grandes. Sin embargo los microbuses son el vehículo de mayor uso en el Distrito Federal.

Uno de los grandes problemas que se tiene en la Ciudad de México es que las concesiones de autobuses no están debidamente reguladas, se cuenta con una gran irregularidad con el nivel de servicio, existe un gran problema con el registro de las rutas y competencia entre rutas, ya que no existe una planeación adecuada.

1.3.4 Red de Transporte Público (RTP)

La Red de Transporte Público del Distrito Federal hace uso de autobuses como se muestran en la Figura 1-14, y que de acuerdo con si sitio web (GDF, 2013); tiene como objetivos:

- Prestar un servicio económicamente accesible para todos;
- Conectar a la población de las zonas periféricas de la ciudad con las estaciones del Sistema de Transporte Colectivo (METRO), y con las rutas del Servicio de Transportes Eléctricos (STE), lo cual obedece a un Programa de Reordenamiento del Transporte Urbano, por parte del Gobierno de la Ciudad; y

- Catalizar las presiones sociales que pudieran tender a la alteración del servicio público de transportación de pasajeros.

El Distrito Federal cuenta con el servicio de rutas (Figura 1-15), las cuales son:

- Rutas de Servicio Atenea (Servicio exclusivo para mujeres).
- Ruta del Circuito Bicentenario
- Rutas de Servicio Expreso (Sistema que opera con paradas exclusivas colocadas estratégicamente a lo largo de las rutas).
- Rutas de Servicio Ordinario.
- Ruta verde "ECOBUS".

Figura 1-14 RTP del Distrito Federal (SETRAVI GDF, 2012)

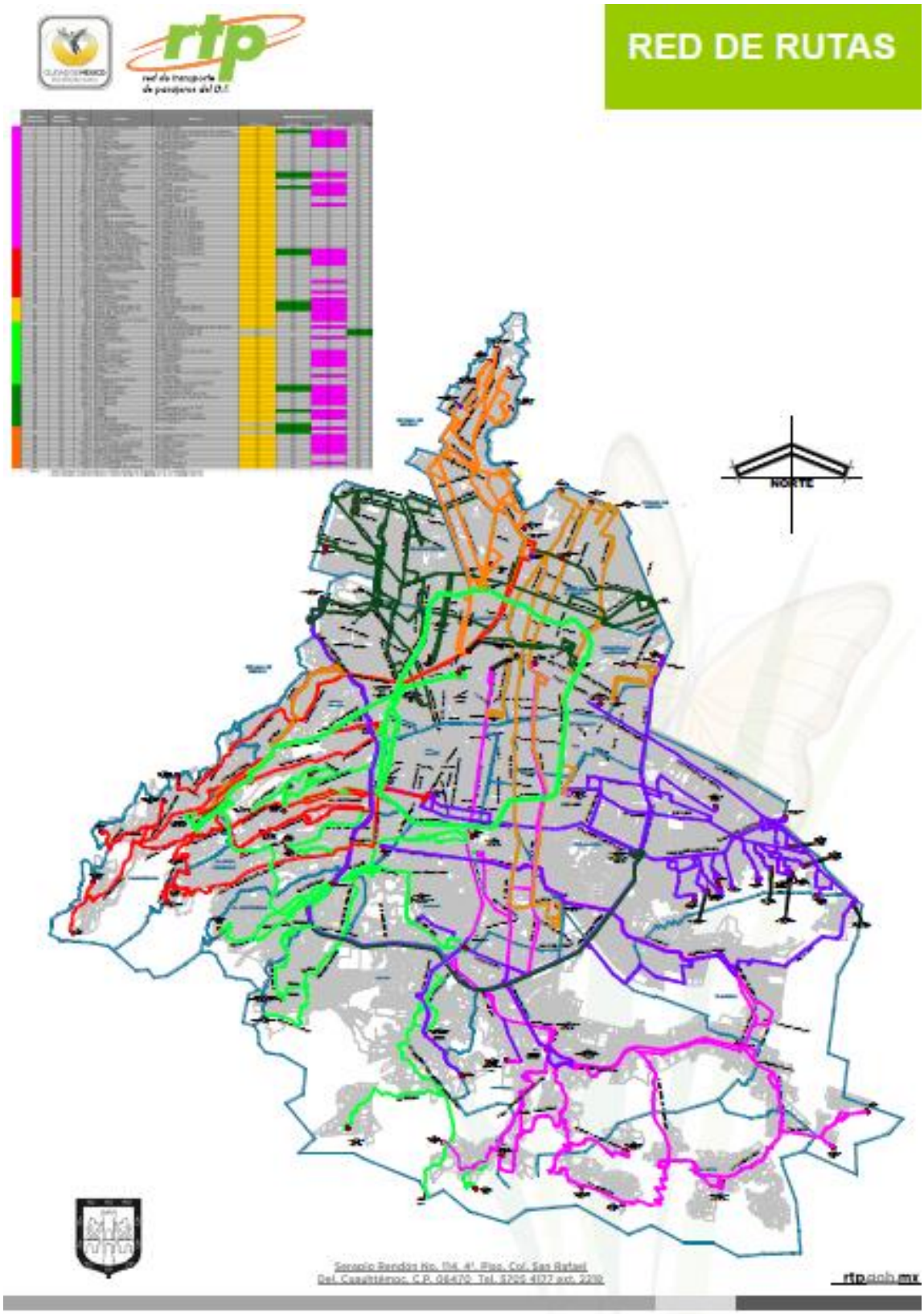


Figura 1-15 Red de Transporte Público RTP (http://www.rtp.gob.mx)

1.3.5 Sistema Colectivo Metro

El Sistema Colectivo Metro de la Ciudad de México, mejor conocido como "Metro", se construye a partir del enorme crecimiento de la ciudad y sus problemas de movilidad, promovido por el Ingeniero Bernardo Quintana con financiamiento del gobierno Francés. Tiene una red de 201 Km y cuenta con tarifas muy bajas (Sort, 2006).

El Metro cuenta con una distribución porcentual del 4.4% de los viajes en un solo modo (INEGI, 2007), si bien se puede observar que cuenta con un bajo porcentaje de uso comparado con el automóvil, taxi y autobús, el mayor porcentaje de los usuarios del Metro lo utilizan como un medio de conexión intermedio de traslado entre otros modos de transporte.

Las características principales del Metro en la Ciudad de México son:

- Opera en distintas líneas que componen la red.
- Cuenta con estaciones a distancias regulares.
- Cuenta con conexión a otros modos de transporte.
- Cubre gran capacidad de personas
- Es un sistema de transporte más rápido.
- Tiene con bajo impacto en imagen urbana.
- Disminución de ruido.

La red del STC se compone de 12 líneas (Figura 1-16) con una red total de 201.388 Km, se muestra la red en la Tabla 1-4 (175 estaciones en total), tiene un parque vehicular de 390 trenes asignados (322 neumáticos y 33 férreos) (Tabla 1-6), puede proporcionar el servicio a los usuarios en horas punta se cuenta con 253 trenes, este número es inferior al parque vehicular total considerando que un determinado número de trenes pueden estar en mantenimiento, número de operadores disponibles u otras causas. En la Tabla 1-7 se muestra la capacidad que se tiene por tipo de tren.

Tabla 1-6 Lineas de la Red del Metro del DF (SETRAVI-GDF, 2012)

Línea	1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	A	B	Total
Trenes	51	41	49	13	26	16	31	30	29	30	39	36	355

Tabla 1-7 Capacidad por tipo de tren del Metro del DF (SETRAVI-GDF, 2012)

Tren	Capacidad		
	Sentados	Parados	Total
6 vagones	240	780	1,020
9 vagones	360	1,170	1,530

Figura 1-16 Red del Metro del DF (SETRAVI-GDF, 2012)

1.3.6 Tren Suburbano

Debido a que el desarrollo de las ciudades en México siguió las líneas férreas cuando no había gran demanda de automóviles, los núcleos urbanos se desarrollaron cerca de las estaciones del tren. A partir de esta configuración territorial y las dificultades actuales de tráfico provocan que se rehúsen estas vías de comunicación, creando el ferrocarril suburbano.

Los ferrocarriles suburbanos unen estaciones de la periferia del casco urbano con núcleos de la población dispersos y separados del centro de la ciudad, por zonas sin urbanizar o zonas menos densamente pobladas a velocidades mayores que el Metro.

En la actualidad los servicios de transporte ferroviario de pasajeros ha desaparecido casi en su totalidad en la Ciudad de México, actualmente se ha rescatado el uso de la vía del tren para un corredor en la Zona Metropolitana del Valle de México en el proyecto del tren suburbano en el tramo Cuautitlán - Buenavista con la propuesta para ampliarse hasta Hidalgo. También existen propuestas de ramales y de nuevas rutas de trenes suburbanos.

El Sistema de Transporte Tren Suburbano está concesionado y cuenta con tarifas que dependen de las estaciones (distancia) recorrida. El ingreso a cada estación del tren se realiza mediante una tarjeta de acceso que es recargable y tiene que ser presentada nuevamente por el usuario al salir de la estación y así asignar la tarifa correspondiente.

Las estaciones de mayor uso cuentan con un CETRAM (Centro de Transferencia Modal), en donde se encuentran diferentes líneas de transporte público, algunas estaciones como Cuautitlán, Tultitlan y Lechería también cuentan con servicio de taxi y bici-estacionamiento en algunas estaciones como Cuautitlán y Tultitlan.

El tren suburbano tiene la ventaja de que su servicio está sujeto a un horario y cuenta con frecuencias fijas las cuales están indicadas mediante carteles o se pueden consultar en su página web.

1.3.7 Tren ligero

El tren ligero forma parte de la red del Servicio de Transportes Eléctricos del Distrito Federal, cuenta con un porcentaje del 0.05% de los viajes en un solo modo (INEGI, 2007), al igual que el modo Metro; para el tren ligero aumenta demanda debido a que es utilizado como una extensión del Metro o como conector entre otros modos de transporte, mas no como uso único.

Opera en el sur de la Ciudad de México a través de 16 estaciones y 2 terminales, mediante 20 trenes dobles acoplados con doble cabina de mando con capacidad máxima de 374 pasajeros por unidad. Es un servicio de transporte que beneficia principalmente a la población de las Delegaciones Coyoacán, Tlalpan y Xochimilco (GDF, 2012).

1.3.8 Trolebús

El trolebús originalmente se inició en 1847 y tenía un Servicio de Transportes Eléctricos (STE) que desarrollaba una red de tranvías urbanos y suburbanos sustituidos posteriormente por los trolebuses (Sort, 2006).

El trolebús cuenta con el 0.7% de los viajes en un solo modo (INEGI, 2007). Es un servicio de transporte público alimentado por energía eléctrica y funciona con autobuses que van conectados a cables de corriente alterna que está sujetados a postes paralelos a la vía pública.

La Red del Servicio cuenta con 10 Líneas que en total tienen una longitud de operación de 258.79 kilómetros. La flota vehicular programada en la Red para 2011 es de 289 trolebuses, los cuales operan a un intervalo de paso promedio de 5.0 minutos, todas dentro del Distrito Federal:

- Corredor cero emisiones Eje Central
- Circuito Politécnico
- Eje 7 - 7 a Sur
- Eje 8 Sur
- Metro Boulevard Puerto Aéreo - Metro El Rosario
- Metro El Rosario - Metro Chapultepec
- Universidad Autónoma de la Ciudad de México - Ciudad Universitaria
- San Felipe de Jesús - Metro Hidalgo.
- Circuito Villa de Cortés
- Eje 5 Oriente
- Corredor Cero Emisiones Eje 2-2a Sur
- Metro Constitución de 1917 - UACM fuera de servicio temporalmente.

1.3.9 Metrobús

El microbús cuenta con el 1.2% de los viajes en un solo modo de transporte y se va incrementando (INEGI, 2007). Es un sistema de transporte público BRT (Bus Rapid Transit) el cual cuenta con carril confinado que le permite el libre tránsito a los autobuses articulados y biarticulados, realizando un traslado rápido y seguro al no haber invasión del carril por los diferentes vehículos que transitan la vía.

Cuenta con estaciones de plataforma elevada, las estaciones permiten ingreso a nivel a los autobuses mediante sistema de prepago; la recarga de las tarjetas de prepago se realiza en máquinas de recarga que se encuentran en la misma estación o en zonas cercanas a la estación.

Actualmente cuenta con una red de 5 líneas (Figura 1-17):

Línea 1: Av. De los Insurgentes (30 Km)
Línea 2: Eje 4 Sur de (25 Km)
Línea 3: Eje 1 Poniente (17 Km)
Línea 4: Centro Histórico (28 Km)
Línea 5: Río de los Remedios - San Lázaro

La Línea 4 usa un concepto diferente ya que el pago electrónico se hace directamente en la entrada del autobús RTP. Hace uso de autobuses de piso bajo por lo que no necesita de andenes para acceso al mismo.

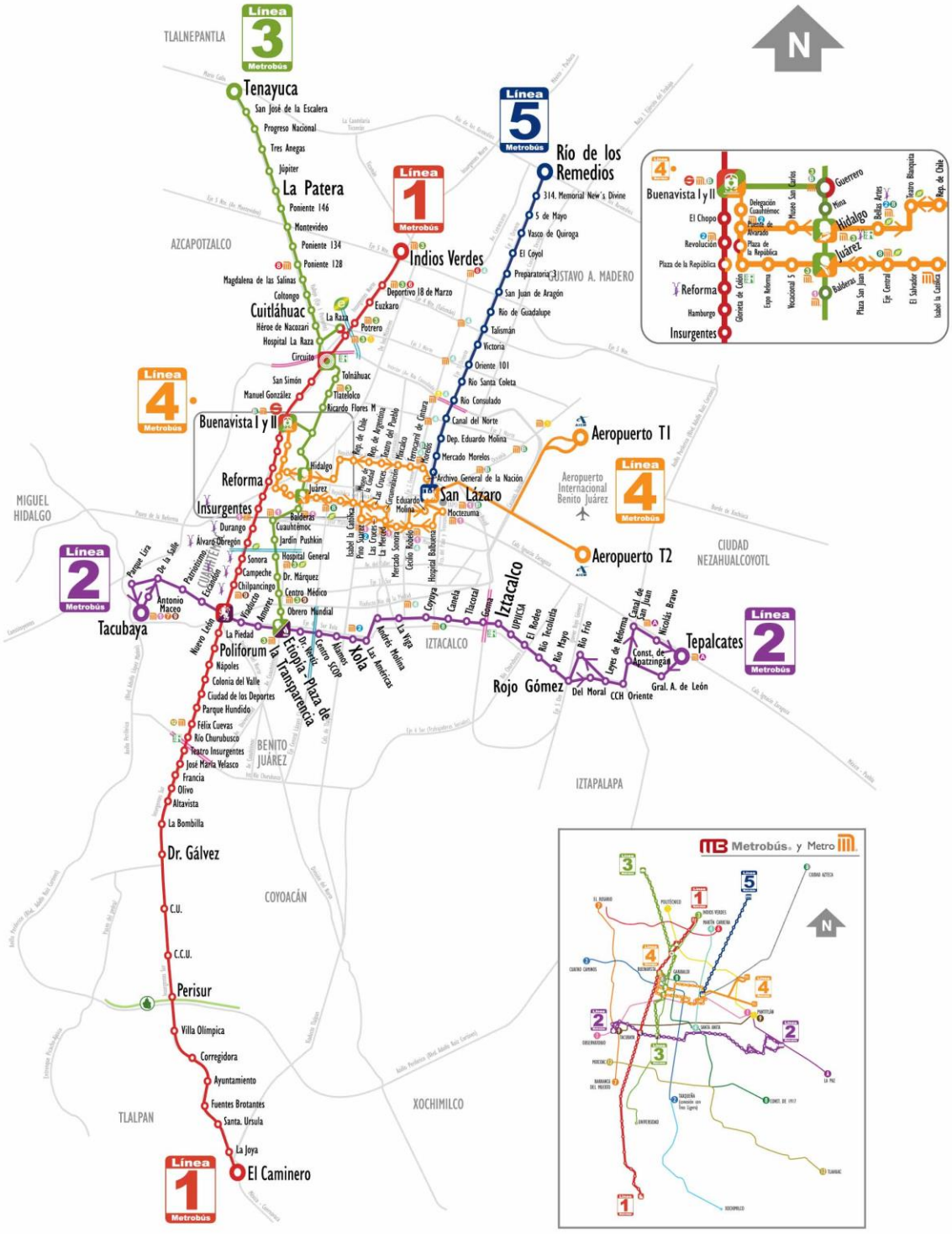


Figura 1-17 Líneas del Metrobús de la Ciudad de México (GDF, 2012)

1.3.10 Bicicleta

La bicicleta es modo alternativo al automóvil para distancias cortas y distancias medias. Uno de las principales problemáticas para la difusión en México de este modo de transporte que está tomando relevancia en el mundo, es la poca conciencia cívica y priorización al ciclista.

En la Ciudad de México se ha implementado un sistema de renta de bicis denominado ECOBICI el cual es un sistema de transporte urbano individual relativamente nuevo en México, que se puede utilizar como complemento a la red de transporte público de la Ciudad de México. ECOBICI es un servicio de renta de bicicletas las cuales se encuentran ubicadas en diferentes puntos de la ciudad para desplazarse en trayectos cortos de manera ecológica.

Cuenta con aproximadamente 90 estaciones en la Colonia Condesa y Colonia Centro del Distrito Federal (Figura 1-18), con planes de expansión a la delimitación dada por las avenidas Viaducto Río Piedad, Eje 1 Poniente (Cuauhtémoc), Fray Servando, Jesús María, República de Venezuela y la calle Valerio Trujano, en el Centro y a la zonas aledañas al centro de Coyoacán.

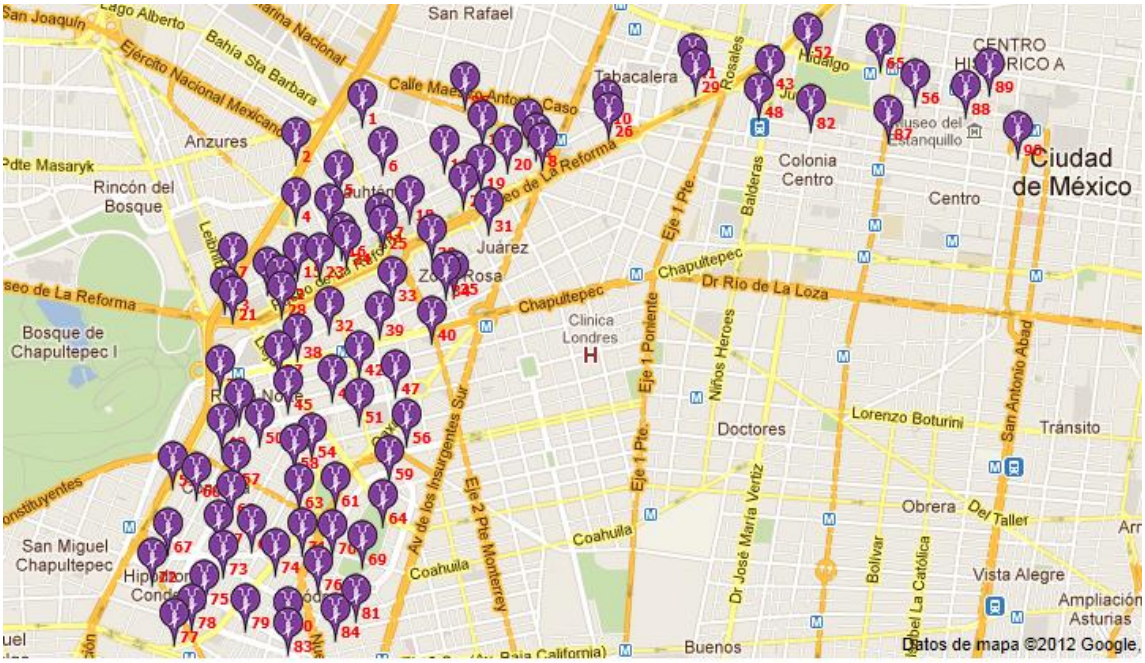


Figura 1-18 Estaciones de servicio ECOBICI (GDF, 2012)

1.4 Transporte en el centro de Coyoacán

La Delegación Coyoacán es una de las 16 delegaciones del Distrito Federal, se encuentra en el centro geográfico de esta entidad, cubre una superficie de 54.4 km cuadrados, cuenta con 140 colonias y representa el 3.6% del territorio del Distrito Federal. Sus coordenadas son al norte19

grados 21 minutos, al sur 19 grados, 18 minutos latitud norte, al este 99 grados 06 minutos, al oeste 99 grados y 12 minutos de longitud oeste.

Sus colindancias son las delegaciones Álvaro Obregón, Benito Juárez, Iztapalapa, Xochimilco y Tlalpan. Su importancia cultural genera viajes a esta área urbana principalmente de la Zona Metropolitana del Valle de México. Se pueden encontrar vehículos de transporte particular (automóvil y bicicleta), transporte público (microbuses, taxis, trolebús, RTP y Metro), y transporte de carga.

Cuenta con inmuebles patrimoniales entre los cuales se tienen como ejemplos representativos que se muestran en la Tabla 1-8.

Tabla 1-8 Inmuebles patrimoniales de los alrededores del centro de Coyoacán (GDF, 2012).

INMUEBLE	UBICACIÓN	USO	ÉPOCA
MUSEO FRIDA KAHLO	LONDRES No. 247	MUSEO	XIX
MUSEO ESCULTÓRICO GELES CABRERA	XICOTÉNCATL 181 ESQ. CORINA	MUSEO	XIX
MUSEO-CASA DE LEÓN TROTSKY	VIENA No. 45 ESQ. MORELOS	MUSEO	XIX
CASA ALVARADO	SALVADOR NOVO No. 88	CASA HABITACIÓN	XVIII
MUSEO NACIONAL DE LA ACUARELA	AV. UNIVERSIDAD Y MIGUEL ÁNGEL DE QUEVEDO	MUSEO	XX
EL ALTILLO	FRANCISCO SOSA Y AV. UNIVERSIDAD	CULTO	XVII
CAPILLA DE SAN ANTONIO PANZACOLA		CULTO	XVIII

Su Centro Histórico ha dado lugar a diversas concentraciones importantes tales como el asiento de la sede delegacional, museos, iglesias, comercio, centros de espectáculos, servicios diversos y oficinas, adaptados en edificaciones patrimoniales de valor histórico y arquitectónico, así como un alto valor de imagen urbana que hacen de esta zona un centro de nivel metropolitano reconocido.

En la Tabla 1-9 se presentan los principales centros culturales en la zona centro de Coyoacán, tomada de la página oficial de la Delegación Coyoacán (GDF, 2012), se pueden observar las principales zonas de mayor confluencia en la zona Centro de Coyoacán y sus alrededores.

Tabla 1-9 Sitios de interés en el Centro Histórico (GDF, 2012).

No	Sitio	No	Sitio
1	Casa Municipal	**13**	Museo Nacional de la Acuarela
2	Jardín Hidalgo	**14**	Puente y Capilla de San Antonio Panzacola
3	Jardín del Centenario	**15**	Foro Cultural Coyoacanense Hugo Argüelles

4	Arcos del Jardín del Centenario (antaño Portada Atrial del templo)	**16**	Mercado de Coyoacán
5	Parroquia y Ex convento de San Juan Bautista	**17**	Museo Frida Kahlo
6	Museo Nacional de Culturas Populares	**18**	Museo Casa de León Trotsky
7	Plaza y Capilla de la Conchita	**19**	Escuela Nacional de Música
8	Casa de los Camilos	**20**	Parque Xicoténcatl
9	Parque Frida Kahlo	**21**	Museo Nacional de las Intervenciones (Ex-convento de Churubusco)
10	La calle Francisco Sosa	**22**	Centro Comercial Plaza Coyoacán
11	Teatro de Santa Catarina	**23**	Cineteca Nacional
12	Casa de la Cultura Jesús Reyes Heroles		

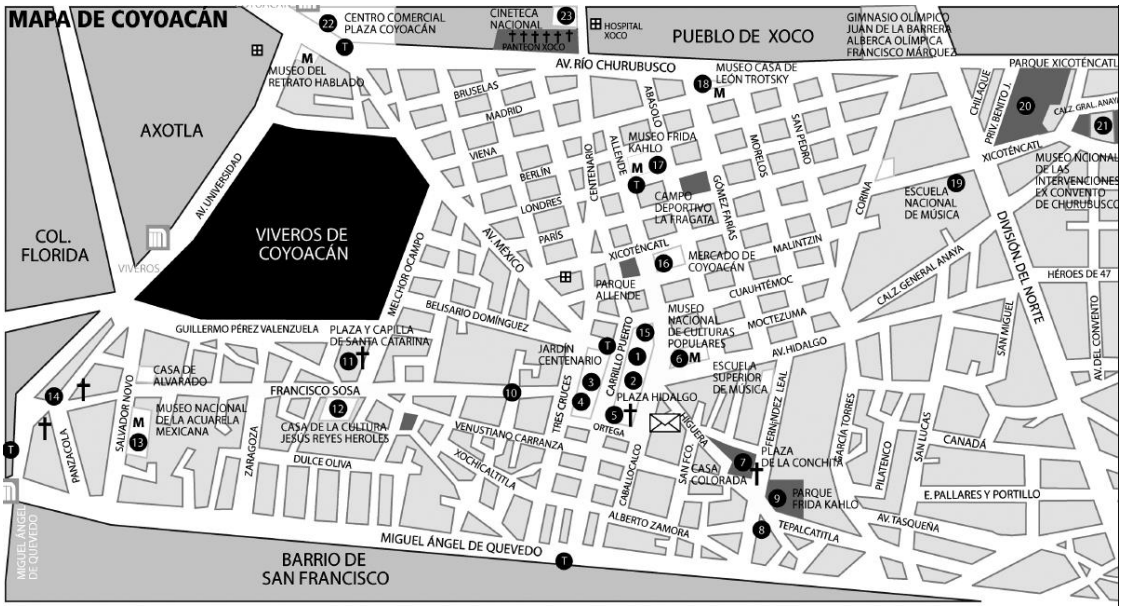


Figura 1-19 Sitios de interés en el Centro Histórico

La Figura 1-19 delimita conceptualmente la zona de estudio de la presente tesis. Dicha zona fue seleccionada debido a ser una zona turística y poseer centros culturales y de recreación que son los puntos focales de los visitantes así como por la diversidad de modos de transporte que transitan en la zona, ya sean automóviles, transporte de mercancías, RTP, microbuses, Metro y peatones.

La zona de estudio se delimita por las calles Av. Universidad, Miguel Ángel de Quevedo, Río Churubusco y Avenida Tlalpan. En esta zona se presentan diferentes modos de transporte urbano público y privado, entre los cuales se encuentran el automóvil, trolebús, microbús, RTP, Metro y transporte de carga, los cuales se describirán en los siguientes puntos.

1.4.1 Transporte urbano público y privado en la zona centro de Coyoacán

A continuación se enuncian los modos de transporte público y privado que existen en la zona de estudio de la Delegación Coyoacán.

Automóvil (Transporte privado)

Existe una gran cantidad de vehículos particulares que llegan al centro de Coyoacán, sus principales rutas de acceso o vialidades primarias de acceso para circular por las avenidas del centro de Coyoacán que son tres Cruces, Felipe Carrillo Puerto, Aguayo, Centenario, Xicoténcatl, México, Progreso y Av. Miguel Hidalgo, son:

- Avenida Universidad
- Río Churubusco
- División del Norte
- Calzada de Tlalpan

Hay que considerar que cuenta con estacionamientos públicos para poder almacenar los automóviles que llegan a la zona principalmente en horas pico y fines de semana, aunque los vehículos pueden ser estacionados sobre la vía pública, ya que por ser una zona turística alberga puntos de reunión social en la zona centro de Coyoacán como zonas culturales, plazas y parques.

Existe un gran falta de estacionamientos públicos en la Delegación Coyoacán como es el centro de Coyoacán, que por su importancia turística y actividades comerciales llega a saturarse principalmente los fines de semana (G.O.D.F., 1997)

Trolebús

La zona de estudio cuenta con la Línea A / 1er Corredor Cero Emisiones - Eje Central

- Origen: Terminal Central de Autobuses del Norte.
- Destino: Terminal Central de Autobuses del Sur.

La línea hace uso de las avenidas principales con un carril de uso preferencial y ocupa las vías Eje Central Lázaro Cárdenas, Av. División del Norte, Av. Miguel Ángel de Quevedo, Av. Taxqueña, por lo tanto no cuenta con servicio en el centro de Coyoacán.

Horario: Lunes a Viernes de 4:42 hrs a 01:26 hrs, Sábado de 04:52 hrs a 01:28 hrs y Domingo de 5:29 a 01:16 hrs

Tarifa: $4.00 pesos

Microbús

En lo que respecta al modo de transporte público concesionado de microbuses, prácticamente en su totalidad circula sobre arterias principales y secundarias. La problemática de la prestación del

servicio radica en lo indiscriminado de las rutas y los conflictos viales que generan. Cuentan con un horario de servicio irregular que va de 5:00 am a las 10 pm. Tiene una tarifa desde $4.00 pesos pasaje en microbuses y $5.00 pesos en autobuses los primeros 5 Km.

Las rutas de microbuses que pasan por el centro de Coyoacán y por calles cercanas son:

- Ruta 1D: Circula por la avenida Miguel Ángel de Quevedo
- Ruta 1-29, San Ángel - Metro Taxqueña
- Ruta 1-30, San Ángel - Central de Abasto
- Ruta 1-16, Metro Taxqueña - Deportivo San Pedro Mártir
- Ruta 1-07, Metro Xola - C.U.
- Ruta 1-08, Poli - C.U.
- Ruta 1-03, Netzahualcóyotl - San Ángel
- Ruta 1-31, Iztapalapa - Coyoacán
- Ruta 1-32, Iztapalapa - C.U.
- Ruta 1-33, San Ángel - Iztapalapa
- Ruta 1-34, Santa Cruz - C.U.
- Ruta 1-46, C.U. - Margarita Maza de Juárez
- Ruta 1-59, Coyoacán - Oficinas Pemex
- Ruta 1-58, Villa Coapa - Oficinas Pemex
- Ruta 1-80, Progresista - Metro Coyoacán
- Ruta 1-90, Raza - Ejes, Tlalnepantla
- Ruta 2-39, Metro Chapultepec - División del Norte – Espartaco

Un punto importante donde suelen hacer base los microbuses es en frente de la plaza Hidalgo, lo que genera conflicto con los automovilistas y peatones que pasan por la zona.

En el centro de Coyoacán se encuentra principalmente el uso de microbuses como vehículo de transporte público. No hay implementaciones de sistema de renta de bicicletas o bici-estacionamientos, lo cual crearía una zona más atractiva aún. También cuenta con servicio de taxi y radio taxi.

En el Centro de Coyoacán no se encontró información en la zona acerca de las líneas de microbuses por lo que los paseantes no se encuentran completamente informados para poder llegar a otro modo importante como es el Metro.

RTP

El sistema de transporte publico RTP, tiene un horario de servicio irregular que va de 5:00 am a las 10 pm y tiene una tarifa desde $2.00 pesos pasaje cuenta con dos líneas que cruzan o pasan cerca del centro de Coyoacán que se enuncian a continuación.

- RTP: Ruta 60, San Ángel - San Lorenzo Tezonco
- RTP: Ruta 116A, Metro General Anaya - Río de Guadalupe

La ruta 116 Metro General Anaya - Río de Guadalupe, conecta con la estación General Anaya de la Línea 2 del Metro y en su recorrido pasa por el centro de Coyoacán

Metro

Cerca dela zona de estudio pasan tres líneas de Metro (línea 2, línea 3 y línea 12) que tienen estaciones que pueden ser puntos importantes para acceder al centro de Coyoacán, las cuales son:

La Línea 2, Toreo – Taxqueña, se conecta en las estaciones General Anaya y Taxqueña con bases de microbuses para ir al centro de Coyoacán.

La Línea 3, Indios Verdes - La Raza, se conecta en las estaciones Viveros, Coyoacán, y Miguel Ángel de Quevedo con bases de microbuses para ir al centro de Coyoacán.

La Línea 12, Mixcoac – Tláhuac, se conecta con las estaciones Zapata en la Línea 3 y Ermita en la línea 2 y sus estaciones más cercanas a Coyoacán son Parque de los Venados y Eje Central.

Las tres líneas cuentan con un horario de servicio en días Laborales de 5:00 a 24:00 horas, sábados de 6:00 a 24:00 horas y domingos y días festivos de 7:00 a 24:00 horas

Tarifa: $5.00 pesos el boleto

El sistema Metro pasa por Calzada de Tlalpan, Avenida Universidad, Eje 7 Sur y Eje 8 Sur, por lo que solo rodea la zona del centro de Coyoacán, por lo cual se necesita hacer uso de otros modos de transporte para poder acceder al centro de Coyoacán.

Transporte de carga (Puntos de atracción)

El centro de Coyoacán cuenta principalmente con locales comerciales y restaurantes para los que se requiere transporte de distribución de mercancías principalmente (Figura 1-20). Debido a que cuenta con arterias de dimensiones reducidas, la distribución de mercancías se atiende día a día a los clientes y se realiza normalmente con flota ligera.

Figura 1-20 Comercios en el centro de Coyoacán

En los alrededores del centro de Coyoacán se encuentran diferentes bancos y cajeros (Banamex, Bancomer, Santander, Ixe banco, etc.) de los cuales es necesario el transporte de valores en el cruce de Felipe Carrillo Puerto y Francisco Sosa (Figura 1-21). Así mismo las tiendas grandes como Sanborns y restaurantes necesitan trasladar valores y mercancías de mayores dimensiones.

Figura 1-21 Bancos en el centro histórico de Coyoacán

2. SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE

En este capítulo se da un panorama general de cómo se han desarrollado los Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT), cuáles han sido sus orígenes y en qué regiones del mundo surgió principalmente el desarrollo de este concepto y cuál ha sido su evolución. Así mismo se exponen las clasificaciones que se les ha dado a los SIT y ejemplos de aplicaciones implementadas en diferentes regiones del mundo, así como en México.

2.1 Historia de los SIT

Las primeras aplicaciones de sistemas de comunicaciones se desarrollaron en los años sesenta en el transporte aéreo y desde entonces la aplicación de las tecnologías de los Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT) se ha venido desarrollando con mayor o menor intensidad para los diferentes modos de transporte. Los SIT han evolucionado para mejorar la seguridad de los viajeros y las mercancías, son una necesidad emergente para la unificación y simplificación de los medios de pago en distintos modos de transporte (Secretaría del Estado de Transporte de España, 2010).

En el ámbito terrestre en los años ochenta, un pequeño grupo de expertos en transporte reconocieron el impacto de la computación y las telecomunicaciones, observaron que la revolución de la era de la información podría tener un impacto favorable en la plataforma de transporte; fue entonces cuando idea de los Sistemas Inteligentes de Trasporte había nacido, originalmente llamados Sistema Inteligente Vehículo-Autopista (Weiland, 2009).

En los años ochenta en Japón no se tenía un nombre específico para los SIT, el cual era considerado como parte del control de tráfico, pero a mediados de los 80 se inició el programa de Japanese Intelligent Vehicle System (IVS). En Europa se comenzó a utilizar la expresión de Advance Transport Telematics (ATT), reflejando así su visión sobre la aplicación de la información y tecnología de las comunicaciones aplicadas en el transporte; pero fue en Estados Unidos donde se utilizó el término SIT dando relevancia al uso de la tecnología a sistemas de tránsito como automóviles privados y carreteras. Esta nomenclatura de SIT ha sido adoptada en congresos mundiales en Estados Unidos, Europa y Japón, y fue utilizada en el primer congreso efectuado en 1994 en París (McQueen & Mc Queen, 1999).

Entre 1984 – 1994 uno de los primeros intereses fue el desarrollo de la telemática para la mejora de la seguridad vial. En Europa se enfocaron en el programa DRIVE (Dedicated Road Infraestructure for Vehicle safety in Europe) que se adoptó en 1988. Sus metas fueron identificar

las mejoras potenciales de la seguridad en la carretera y reducir la congestión en la red de carreteras europeas mediante el apoyo, la explotación de la investigación y el desarrollo de tecnologías de información y telecomunicaciones. En el programa DRIVE se realizaron recomendaciones para el uso de bandas de radiofrecuencias para sistemas de información al transporte en carreteras.

En 1988 en Estados Unidos, un equipo de estudio no oficial, “Mobility 2000”, comenzó a centrarse en cómo la tecnología podría ayudar a resolver las terribles congestiones de tránsito. En 1990, estas actividades se reforzaron con el establecimiento de la IVHS América (Intelligent Vehicle Highway Society of America). IVHS América se convirtió en marzo de 1991 en un comité de asesoría federal utilizado por el Departamento de Transporte de los Estados Unidos de América (US-DOT) y cambió de nombre a SIT América en 1994, sociedad científica y educativa con fines no lucrativos cuya meta es coordinar y acelerar el desarrollo, la difusión, la integración y la aceptación de tecnologías de transporte avanzadas en los Estados Unidos.

En el año 1991 se promulgó el decreto de Eficiencia del Transporte Intermodal de Superficie, en los Estados Unidos propició el desarrollo y utilización de tecnologías para ayudar a administrar los sistemas de transporte urbano. Como consecuencia de esta legislación surgieron avances en la tecnología de los sistemas inteligentes de transporte (SIT), para brindar mejoras a la movilidad, seguridad y requerimientos de los usuarios (Herrera, 2008).

En Junio de 1997 se creó ITS Canadá; el papel de esta organización en Canadá está orientado principalmente a la investigación que a aspectos operativos (Secretaría del Estado de Transporte de España, 2010).

La Secretaría de Estado de Transporte de España (2010), menciona que los SIT surgen en la década de los años noventa como alternativa sustentable al problema generado por la creciente demanda de movilidad, especialmente en el ámbito urbano e interurbano.

También menciona las posibilidades que ofrecen las nuevas formas de comunicación se reflejan de forma clara en la gestión empresarial, en la mejora de información a los viajeros y en el perfeccionamiento de los sistemas de gestión e inspección administrativa.

Los sistemas de posicionamiento, los elementos de localización de flotas, las tarjetas electrónicas de cobro, los sistemas de información a los usuarios en tiempo real o el tacógrafo digital, son ejemplos claros de los beneficios que todos los agentes involucrados en el transporte obtienen con la implementación de las tecnologías emergentes.

El sistema que más funcionalidades ha aportado a los SIT probablemente sea el monitoreo del tráfico a través de cámaras, tanto en carreteras como en entornos urbanos. Inicialmente las cámaras de monitoreo eran utilizadas en carretera para observar lo que ocurría en tramos especialmente conflictivos (Secretaría del Estado de Transporte de España, 2010). El uso de las cámaras han pasado de ser elementos de captación de imágenes para convertirse en el elemento fundamental de ciertos procesos inteligentes que aportan numerosa información para realizar

análisis, que es utilizada de forma manual o automática para la toma de decisiones y la ejecución de otros procesos.

2.2 ¿Qué son los SIT?

Existen diferentes definiciones que se dan a los SIT, cada autor tiene una manera particular en definirlos, en los puntos de este apartado se expresan algunas definiciones de SIT, los beneficios que ofrecen, así como las problemáticas que pueden encontrarse por el manejo de información. Finalmente se enlistan las instituciones que se enfocan en la investigación y desarrollo de los SIT.

2.2.1 Definiciones de los SIT

El Instituto Mexicano del Transporte (IMT), ha realizado de investigación en el tema de los SIT; mencionan que los SIT combinan el uso de la informática y las telecomunicaciones para crear aplicaciones que ayuden al transporte. Este instituto en su página web menciona que con ayuda de los SIT se creen caminos, vehículos y usuarios "más inteligentes". La aplicación de estas tecnologías mejorara la operación y seguridad de los sistemas de transporte al proveer rutas más eficientes y mecanismos de advertencia de colisiones

La Secretaría de Estado de Transporte de España (2010), en su publicación Los Sistemas Inteligentes de Transporte, mencionan que los SIT se pueden definir como un conjunto de aplicaciones avanzadas dentro de la tecnología informática, electrónica y de comunicaciones que, desde un punto de vista social, económico y medioambiental, están destinadas a mejorar la movilidad, seguridad y productividad del transporte, optimizando la utilización de las infraestructuras existentes, aumentando la eficiencia del consumo de energía y mejorando la capacidad del sistema de transportes.

Acha y Espinoza (2004) en el informe “Hacia una Arquitectura Nacional para los Sistemas Inteligentes de Transporte” ofrece la definición siguiente: “SIT es la aplicación de tecnología avanzada de captura y proceso de información, comunicaciones y control para mejorar la eficiencia y la seguridad en un sistema de transporte” (Acha & Espinoza, 2004). Aunado a esta definición, comentan que los SIT son una nueva forma de trabajar en equipo compartiendo información, e inclusive sistemas entre los actores involucrados tanto de la misma dependencia como de diferentes dependencias y jurisdicciones.

Los SIT no resuelven por sí mismos los problemas de transporte, requieren la intervención de personas en actividades complementarias de gestión y de operación.

En la actualidad existen muchos problemas de movilidad en las ciudades, no se debe de depender únicamente de la construcción de infraestructura nueva para dar soluciones a los problemas de transporte y movilidad, sino que se debe trabajar con la infraestructura existente que con ayuda de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC) y el uso de las tecnologías más

recientes para monitorear las vialidades para obtener información y llevar un control de las mismas mediante dispositivos como los que se enuncian a continuación.

- Cámaras de video para detectar accidentes
- Tableros de mensajes dinámicos de información vial
- Detectores de vehículos para calcular tiempos de recorrido
- Sistemas de pago electrónico en plazas de cobro
- Centros de gestión de tránsito
- Software de integración de sistemas
- Sistemas inteligentes de semáforos, etc.

La gestión de la información obtenida por las TIC da pie al desarrollo de los SIT, que de acuerdo con el Libro Verde de los SIT España que es una publicación de la Unión Europea (UE) de políticas de adaptación a los impactos del cambio climático, en el Libro Verde de los SIT se menciona que la gestión del transporte cada vez es más necesaria y está concesionada por las políticas del medio ambiente, urbanísticas, de seguridad social y económico sociales (pérdida de tiempo, confort educación, etc.) (CICCP, 2003). Con éstos y muchos otros más elementos que se pueden sumar a la lista se puede crear un sistema integral dando un uso eficiente de la infraestructura de las vialidades.

Los SIT describen un amplio rango de tecnologías de la telemática (telecomunicaciones e informática) orientadas para resolver problemas de la movilidad y el transporte logrando así la reducción de agentes contaminantes en el medio ambiente, ahorro de tiempo, control y disminución de accidentes entre otros. El manejo de información puede ser de forma estática o en tiempo real, dependiendo de cómo sea su procesamiento en la toma de decisiones de manera "inteligente" (CICCP, 2003).

Estos sistemas están basados en tres características fundamentales que son la información, la comunicación y la integración. La adquisición, procesamiento, integración y el suministro de la información son también una parte principal de los sistemas de transporte inteligentes, haciendo que las autoridades, operadores y viajeros tengan mejor información, estén más coordinados y les facilite la toma de decisiones más inteligentes.

Las tecnologías SIT también ofrecen la posibilidad de crear nuevos servicios en torno a la información, como planificación de trayectos y alertas de tráfico previos al desplazamiento, así como diferentes modelos de gestión y tarificación flexible, en función del uso, las emisiones o las horas pico.

Una estrategia de SIT debe formularse a largo plazo para anticiparse a la demanda de nuevos servicios por parte de los usuarios, teniendo en cuenta todos los modos de transporte y las crecientes capacidades de las nuevas tecnologías, como los sistemas de posicionamiento global de última generación y el rápido despliegue de los "asistentes personales digitales" (PDA por sus siglas en inglés Personal digital Assistant) para disponer de información en tiempo real (Houghton, et al., 2009).

Sánchez (2001) menciona algunas mejoras que ofrecen los Sistemas Inteligentes en el campo del transporte y en particular en la gestión de carreteras permite conseguir entre otras cosas:

- Mejora en eficiencia del sistema.
- Mejora en la seguridad vial.
- Mejora en protección del medio ambiente.
- Mejora del confort.
- Mejora de información para sus viajes.
- Mejora en la rapidez de las respuestas a emergencias.
- Mejora en fluidez en la circulación y tener menor congestión.
- Mejora del control de las flotas.
- Mejora en la entrega de las cargas.

Estas mejoras sirven para lograr el objetivo de movilidad sustentable (paralelo y necesario para el desarrollo sustentable) (Sánchez, A. 2001). Los SIT son una herramienta fundamental para gestionar el transporte, pueden integrar el funcionamiento de los diferentes modos de transporte y permiten un desarrollo sustentable mediante un mejor manejo de los recursos de infraestructura disponibles.

2.2.2 Beneficios y Problemáticas de los SIT

Algunos de los beneficios que proporcionan los SIT son las ventajas económicas, sociales y de impacto comunitario. Cuentan con el potencial para entregar beneficios significativos a usuarios de carreteras y a administradores de un sistema de carreteras. Button & Hensher (2001), enuncian una lista de beneficios que ofrecen los SIT.

- Mejoramiento de la utilización de la infraestructura.
- Mejoramiento del flujo de tráfico
- Mejoramiento del servicio de transporte público
- Fortalecimiento de la seguridad
- Reducción de costos en transporte de carga
- Reducción del impacto ambiental

Sin embargo, la implantación de SIT conlleva algunos problemas a los que se les tiene que hacer frente; Button & Hensher (2001) presentan algunos aspectos que hay que cuidar:

- Privacidad: Algunos usuarios pueden sentir invasión a su intimidad. Se plantean las preguntas de ¿Quién es el dueño de la información?, ¿Quién tiene acceso a la información?, ¿Para qué se usa la información? y ¿Los usuarios pueden mantener su anonimato?.

- Legal: Debido a fallas en regulaciones en cuanto a la aplicación de las tecnologías.

- Equidad**:** No todos los usuarios tienen acceso a la tecnología o información ofrecida dependiendo del tipo de implementación, o el usuario no disponibilidad para pago de

tarifas. No todos los gobiernos pueden implementar un SIT debido a que la inversión pública implementación de un SIT es alta.

- Estandarización**:** Los SIT por ser relativamente nuevos, sigue siendo ámbito de estudio por distintas instituciones y regiones. Esto provoca que no se cuente con una estandarización general en el mundo, lo cual requiere de un regulador para homologar términos y tecnologías que se pueden aplicar.

2.2.3 Instituciones Internacionales SIT

Existen múltiples instituciones que tienen como objetivo la coordinación e investigación en SIT, para así armonizar, compatibilizar los sistemas y fomentar el intercambio de información.

Las tres instituciones más importantes los describe Benítez (2001), en su tesis "Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT) señalización dinámica", los cuales se describen a continuación.

- ITS América (Intelligent Transport Society of America): Esta organización se creó en 1990 con sede en Washington D.C. y agrupa a los países siguientes:

  - ✓ Canadá
  - ✓ Estados Unidos de América
  - ✓ México
  - ✓ Brasil
  - ✓ Chile
  - ✓ Argentina
  - ✓ Sudamérica

- ERTICO (European Roads and Transport Intelligent Commission): Organismo con sede en Bruselas Bélgica, que agrupa a los países siguientes:

  - ✓ Bélgica
  - ✓ Inglaterra
  - ✓ Francia
  - ✓ Alemania
  - ✓ España
  - ✓ Italia
  - ✓ Holanda
  - ✓ Suecia
  - ✓ Dinamarca
  - ✓ Noruega
  - ✓ Portugal
  - ✓ Irlanda
  - ✓ Rumania
  - ✓ Grecia
  - ✓ Polonia

- ITS Japan (Intelligent Transport Society of Japan): Organismo con sede en Tokio, Japón, que agrupa a los países siguientes:

  - ✓ Japón
  - ✓ Corea
  - ✓ China
  - ✓ Taiwán
  - ✓ Hong Kong
  - ✓ Indonesia
  - ✓ Nueva Zelanda
  - ✓ Australia
  - ✓ Malasia
  - ✓ Kuala

- ✓ Taipéi
- ✓ Singapur
- ✓ Lumpur
- ✓ Vietnam

Muchos países en el mundo cuentan con instituciones para promover el desarrollo y búsqueda de la homogeneidad de los SIT. En la tabla 2-1 se presentan las principales instituciones SIT en el mundo (Se utiliza el acrónimo ITS por sus siglas en inglés, Intelligent Transportation Systems).

Tabla 2-1. Instituciones SIT en el mundo

Instituciones SIT en el Mundo	
• ITS America	• ITS Japan
• ERTICO	• ITS Korea
• ITS Australia	• ITS Malaysia
• ITS Austria	• ITS Munich
• ITS Brazil	• ITS Netherlands(Connekt)
• ITS Colombia	• ITS Norway
• ITS China	• ITS Spain
• ITS Canada	• ITS Singapore
• ITS Chile	• ITS South Africa
• ITS Czech Republic	• ITS Sweden
• ITS Finland	• ITS Taiwan
• ITS France	• ITS Thailand
• ITS Hong Kong	• ITS United Kingdom
• ASIT India	• ITS México
• ITS Italia	• Road Engineering Association of Malaysia

ITS México afirma que ha trabajado en colaboración con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y con ITS América para integrar una Arquitectura SIT en México; pero no se cuenta con mucha información de este organismo; en diferentes artículos solo se pueden encontrar referencias difusas. Cuenta con sitio web en internet (http://www.itsmexico.org.mx/) pero no cuenta con información relevante sobre proyectos en los que ha colaborado ni las gestiones realizadas.

Existe poca información y desarrollo de SIT en México, a pesar de que en diferentes locaciones del mundo los SIT tienen gran relevancia desde los años noventa, en México aún nos encontramos en una etapa temprana de implementación de estos sistemas. En México se tienen problemáticas en el transporte, por lo cual se tiene la oportunidad de utilizar las nuevas tecnologías.

2.2.4 Áreas funcionales de los SIT

Las áreas funcionales son la agrupación de diferentes servicios que se pueden ofrecer al usuario de los SIT, operan sistemáticamente para ofrecer una aplicación a los usuarios. Existe una gran diversidad de aplicaciones de los SIT que se mencionan en el punto 2.1 del presente capitulo; diferentes instituciones cuentan con su propia arquitectura, de acuerdo a las necesidades de la región.

Ejemplos de Arquitecturas SIT

Una arquitectura define los elementos y su interrelación para asegurar que los sistemas, equipos y servicios relacionados con SIT que se desarrollan sean compatibles, y que puedan utilizarse en las distintas regiones, se requiere el manejo de mucha información, que incluye desde la definición de los servicios al usuario, identificación de los actores involucrados, sus interrelaciones, los flujos de información entre ellos, etc.

De la tabla 2.2 a la tabla 2.7 se presentan tres diferentes clasificaciones de acuerdo a cada arquitectura que ha adoptado cada institución en Canadá, Japón, Estados Unidos y Europa.

En la Tabla 2-2 se presenta la relación de servicios al usuario de los SIT de acuerdo con el Departamento de Transporte de los Estados Unidos (DOT), en la Tabla 2-3 Borges et al (2001) identifica treinta y cinco servicios para una clasificación SIT en Canadá, la Tabla 2-4 presenta de acuerdo con Acha y Espinoza (2004), la clasificación de servicio al usuario de ITS Japón al 2004.

Tabla 2-2 Servicios al usuario de los SIT, de acuerdo con el Departamento de Transporte de E.U.A. (Iteris, 2002)

Área funcional	Servicios al usuario
Administración de viajes y de transporte	1) Información antes de salir de viaje 2) información para el conductor en tránsito 3) Selección de rutas 4) Reservaciones y vehículos compartidos 5) Información de servicios para el viajero 6) Control de tránsito 7) Administración de incidentes 8) Administración de la demanda de viajes 9) Verificación y reducción de emisiones 10) Información de intersecciones ferrocarril carretera
Operaciones de transporte público	11) Administración del transporte público 12) Información para el viajero en tránsito 13) Transporte público personalizado 14) Seguridad para el usuario del transporte público
Operaciones de vehículos comerciales	16) Liberación electrónica de vehículos comerciales 17) Inspección automática de seguridad al lado de los caminos 18) Monitoreo de seguridad a bordo de las unidades 19) Procesos de administración de vehículos comerciales 20) Respuesta a incidentes con materiales peligrosos 21) Administración de flotillas comerciales
Manejo de Emergencias	22) Notificación de emergencias y personal de seguridad 23) Administración de vehículos de emergencia

Sistemas avanzados de control de vehículos y seguridad	24) Eliminación de colisiones longitudinales 25) Eliminación de colisiones laterales 26) Eliminación de colisiones en intersecciones 27) Mejoras visuales para evitar choques 28) Alertas de seguridad 29) Activación de restricciones al movimiento antes de los impactos 30) Operación automática de vehículos
Manejo de información	31) Funciones de información almacenada
Administración de mantenimiento y construcción de caminos	32) Operaciones de mantenimiento y construcción

Tabla 2-3 Servicios al usuario de los SIT propuestos en la arquitectura canadiense (Borges, et al., 2001)

Área funcional	Servicios al usuario
Servicios de información al viajero	1) Información al viajero 2) Selección de rutas y navegación 3) Reservaciones y vehículos compartidos 4) Información de servicios para el viajero
Servicios de administración del tránsito	5) Control de tránsito 6) Administración de incidentes 7) Administración de la demanda de viajes 8) Administración de condiciones ambientales 9) Operaciones y mantenimiento 10) Advertencia dinámica automática y vigilancia 11) Seguridad de usuarios no automovilistas en los caminos 12) Seguridad y control en intersecciones multimodales
Servicios de transporte público	13) Administración del transporte público 14) información para el viajero en tránsito 15) Transporte público personalizado 16) Seguridad para el usuario del transporte público
Servicios de pago electrónico	17) Servicios de pago electrónico
Operación de vehículos comerciales	18) Liberación electrónica de vehículos comerciales 19) Inspección automática de seguridad al lado de los caminos 20) Monitoreo de seguridad a bordo de las unidades 21) Procesos de administración de vehículos comerciales 22) Administración de carga intermodal 23) Administración de flotillas comerciales
Servicios de administración de emergencias	24) Notificación de emergencias y personal de seguridad 25) Planeación del movimiento y respuesta a incidentes con materiales peligrosos 26) Administración de respuestas a accidentes 27) Administración de vehículos de emergencia
Sistemas de seguridad y control de vehículos	28) Eliminación de colisiones basada en los vehículos 29) Eliminación de colisiones basada en la infraestructura 30) Mejoras a la seguridad en la conducción basada en sensores 31) Alertas de seguridad 32) Activación de restricciones al movimiento antes de los impactos 33) Operación automática de vehículos
Servicios de almacenamiento de información	34) Administración de datos de clima y medio ambiente
	35) Funciones de Información almacenada

Tabla 2-4 Servicios al usuario de los SIT propuestos en la arquitectura de ITS Japón (Acha & Espinoza, 2004)

Área de funcional	Servicios al usuario
Avances en sistemas de navegación	1) Proveer información de guía en rutas 2) Proveer información relacionada al destino
Sistemas de cobro electrónico de cuotas	3) Cobro electrónico de cuotas
Asistencia para una conducción segura	4) Proveer información acerca de las condiciones de manejo y del camino 5) Advertencia de peligros 6) Ayuda para conducir 7) Sistemas de carreteras automáticas
Optimización de la administración del tránsito	8) Optimización del flujo de tránsito 9) Proveer información acerca de las restricciones de tránsito cuando ocurran incidentes
Mayor eficiencia en la administración de caminos	10) Mejora de las operaciones de mantenimiento 11) Administración de vehículos comerciales especiales 12) Proveer información de peligros en los caminos
Soporte para el transporte público	13) Proveer información del transporte público 14) Asistencia para las operaciones del transporte público y su administración
Mayor eficiencia en la operación de vehículos comerciales	15) Asistencia para la administración de operaciones de vehículos comerciales 16) Formación automática de pelotones de vehículos comerciales
Soporte para peatones	17) Proveer rutas para peatones 18) Eliminación de accidentes peatón vehículo
Soporte para la operación de vehículos de emergencia	19) Notificación automática de emergencias 20) Proveer rutas para vehículos de emergencia y soporte para las actividades de ayuda 21) Utilización de información en una sociedad de información y telecomunicaciones avanzadas

Estas tres clasificaciones tienen semejanzas en cuantos a servicios a los usuarios ofrecidos pero se diferencian en cuanto al área funcional a la que están asignados principalmente la clasificación de Japón con Canadá y Estados Unidos. En contraparte la clasificación de Estados Unidos y Canadá tienen mayor equivalencia.

En el Libro Verde de los SIT (CICCP, 2003), se presenta otra clasificación donde se diferencian los servicios que pueden ofrecerse a vehículos y a infraestructura (tabla 2-5). En la Tabla 2-6 se presenta el desglose de aplicaciones de SIT en infraestructura y de igual manera la Tabla 2-7 se desglosa la aplicación de los SIT a los automóviles.

Tabla 2-5 Clasificacion SIT de acuerdo al Libro Verde (CICCP, 2003)

SIT Carretera	
Infraestructuras	**Vehículos**
- Sistemas de gestión arterial - Sistemas de gestión de autopistas - Seguridad y prevención de accidentes - Sistemas de gestión de incidencias - Gestión de emergencias - Pago electrónico - Información de viajes - Gestión de la información - Mantenimiento y operaciones - Gestión meteorológica - Gestión de flotas	- Sistemas de asistencia al conductor - Sistemas de aviso de colisiones

Tabla 2-6 Aplicaciones de los SIT a la infraestructura de carretera (CICCP, 2003)

Sistemas de Gestión Arterial	**Sistemas de gestión de autopistas**

• Vigilancia del tráfico
• Cumplimiento
  - Cumplimiento velocidad Cámaras de luz roja
  - Distribución de información
• Gestión de estacionamientos
• Control del tráfico
  - Prioridad al transporte público
  - Prioridad vehículos emergencia
  - Control adaptativo de señales
  - Sistemas de señales avanzadas
  - Peatones y bicicletas
  - Acontecimientos especiales
• Distribución de información
  - Señales de mensajes dinámicos
  - Sistemas de información en el vehículo
  - Asesoramiento de rutas por radio
	• Vigilancia del tráfico
	• Control de rampas
	  - "Control de Accesos a vías de Alta Capacidad"
	  - Cierre de accesos
	  - Accesos prioritarios
	• Gestión de carriles
	  - Carriles de alta ocupación
	  - Carriles reversibles
	  - Tarifas
	  - Control de carriles
	  - Límites de velocidad variables
	  - Evacuación por emergencias
	• Gestión de eventos
	  - Eventos ocasionales
	  - Eventos frecuentes
	  - Otros eventos
	  - Centros temporales de gestión
	• Cumplimiento
	  - Cumplimiento de la velocidad
	  - Cumplimiento de BUS-VAO
	  - Cumplimiento " Control de Accesos a vías de Alta Capacidad "
	• Distribución de la información
	  - Señales de mensajes dinámicos
	  - Asesoramiento de rutas
	  - Sistemas "dentro del vehículo"

Seguridad y prevención de accidentes	**Sistema de Gestión de Incidencias**

• Aviso de geometría de carretera
  - Aviso de rampa
  - Aviso de curvas
  - Aviso de pendientes
	• Vigilancia e identificación
	  - S.O.S
	  - Wireless E911
	  - Imagen / video

• Detección de intersecciones • Seguridad de peatones • Aviso de bicicletas • Aviso de animales	- Detectores - Reportes de viajeros • Recuperación nivel de servicio - Investigación - Video - Control temporal del tráfico • Movilización y respuesta - Localización automática de vehículos - Respuesta de enrutamiento - Patrullas de asistencia • Distribución de información - Mensajes dinámicos - Asesoramiento de rutas por radio
Gestión de emergencias	**Pago electrónico**
• Operaciones de emergencias - Operaciones de evacuación - Gestión de respuestas • Telemedicina • Mercancías peligrosas	• Recaudación de peaje • Pago transporte público • Sistemas multiuso
Información de Viajes	**Gestión de la Información**
• Información pre-viaje y en ruta • Turismo y acontecimientos - Servicios de viaje - Aparcamiento avanzado - Pago electrónico	• Archivo de los datos
Mantenimiento y Operaciones	**Gestión Meteorológica**
• Mantenimiento de flotas - Localización de Vehículos - Control “a bordo” • Gestión de zona de trabajo - Gestión de autopistas - Internet/Wireless/teléfono - Información rutas por radio • Gestión de infraestructuras - Control automatizado - Respuesta coordinada	• Vigilancia y monitorización - Estado de las carreteras - Condiciones atmosféricas • Respuesta y tratamiento - Mantenimiento invernal fijo - Mantenimiento invernal móvil • Control del tráfico - Límites velocidad variables - Señales - Uso de los carriles
• Distribución de información - Tableros de información dinámicos - Internet/Wireless/teléfono	• Distribución de información - Paneles mensajes dinámicos - Internet/Wireless/teléfono - Estado de rutas por radio
Gestión de Flotas	**Mercancías intermodales**
• Licencias y autorizaciones - Registro electrónico - Pago electrónico • Detección electrónica - Seguridad - Fronteras - Pesos	• Carta de porte • Seguimiento de activos • Pasos fronterizos • Seguimiento de carga • Acceso a terminales • Redes y terminales

- Licencias • Seguridad - Intercambio información - Inspección automatizada • Gestión de operadores - Localización de vehículos - Control "a bordo" - Información al viajero	

Tabla 2-7 Aplicación de los SIT a los automóviles (CICCP, 2003)

Sistemas de asistencia al conductor	Sistemas de aviso de colisiones	Transporte Público
• Control de la velocidad • Navegación • Ayuda a la conducción • Estacionamiento automático • Comunicación conductores - Con centro - Con otros conductores • Seguimiento de carga • Mejora de visión • Acoplado de vehículos • Grabación de eventos • Gestión de eventos • Control a bordo - Condiciones de la carga - Condiciones de seguridad - Condiciones del conductor - Diagnóstico del vehículo	• Cambios de carril • Alcance • Detección de obstáculos • Salidas de calzada • Intersecciones • Notificación de colisiones - S.O.S.	• Gestión de flotas - Localización de vehículos - Mantenimiento - Planificación • Seguridad - A bordo - Instalaciones • Gestión de demanda - Ajuste de la oferta - Enrutamiento dinámico - Coordinación de servicios • Distribución de información - A bordo - En terminales - Internet/Wireless/teléfono

Estas áreas funcionales buscan abarcar los distintos ámbitos en los que se desenvuelve el transporte, su infraestructura, asistencia técnica y soporte al usuario, en las cuales pueden encontrar un campo de aplicación los SIT. Se puede observar que existen diferentes áreas funcionales dependiendo del país u organización SIT.

Es pertinente aclarar que la nomenclatura y nombres tratados cambian dependiendo de la arquitectura SIT de cada país, también suele ser variable dependiendo del autor; esto es debido a que aún no se tiene una estandarización, lo cual llega a causar confusiones a la hora de identificar a las distintas herramientas que manejan los SIT.

2.3 Clasificación de los SIT

La gran diversidad de herramientas de los SIT comprende vehículos inteligentes y carreteras inteligentes, buscan reducir tiempos de recorrido y aumentar la seguridad vial (CICCP, 2003). En la Tabla 2-8 se enlistan algunas de las aplicaciones más comunes e importantes que se han mencionado así como sus siglas.

Button & Hensher (2001), hacen referencia en el "Manual de Transporte y Control de Tráfico", menciona que una de las más importantes categorías, que es la columna vertebral de los SIT, son los Sistemas Avanzados de Información al Viajero, el cual se describe más adelante en este punto.

Para la clasificación de los SIT se utilizaron las referencias de Button & Hensher (2001) y el CICCP (2003) principalmente (Tabla 2-8).

En la literatura aún existen diferencias en cuanto a las abreviaturas que se dan a las áreas funcionales de los SIT, por ejemplo ATMS, se refieren al acrónimo de Advance Trasnportation Management Systems, pero en otras fuentes de información hace referencia a los Advance Traffic Management Systems, son muy parecidos pero tienen diferencias muy grandes. En esta tesis se utiliza la nomenclatura ATMS para los Advanced Traffic Management Systems.

Los **ATMS** (*Advanced Traffic Management Systems,* por sus siglas en inglés) incluyen las herramientas necesarias para agencias gubernamentales en la gestión y control de tráfico en vías públicas (Button & Hensher, 2001). Entre las tecnologías que utiliza se pueden encontrar:

- Señalización de tráfico
- Pago Peaje electrónico
- Sistema de gestión de incidentes mediante el uso de mapas electrónicos.
- Gestión de estacionamientos
- Gestión de incidentes
- Sistemas de información
- Otras aplicaciones SIT

Los ATMS la tecnología aplicada, componentes institucionales y humanos para recolectar, procesar y diseminar información. Esta información puede servir para el control de tráfico en carreteras o una zona a través de un centro de tráfico o una computadora central para ofrecer los mejores flujos de tráfico u ofrecer información a los usuarios.,

Tabla 2-8 Clasificación de los SIT

Siglas en inglés	Nombre en inglés
ATIS	Advanced Traffic Information Systems
ATCS	Adaptive Traffic Control System
AVCS	Advance Vehicle Control System
FMS	Freight Management System
APTS	Advance Public Transportation System
CVO	Commercial Vehicle Operations
AVI	Automated Vehicle Identification
EMS	Emergency Management System
ETC	Electronic Toll Collection
ROG	Route Guidance System

Sistemas Avanzados de Información al Viajero

Los **SAIV** (Advanced Traveler Information Systems, por sus siglas en inglés) cuentan con adquisición de información, análisis y emisión de respuesta al viajero para ayudarle en su desplazamiento.

Forman parte de los sistemas inteligentes de transporte, que proporcionan información estática y dinámica, antes y durante los viajes. Un ejemplo de información estática son las tarifas; la información dinámica incluye condiciones del tránsito en tiempo real, notificación de accidentes, demoras, disponibilidad de espacios para estacionamiento (Figura 2-1) y guía en ruta por medio de mapas digitales entre otras. Proveen de información a los viajeros en sus casas, en el trabajo, en las calles, en las estaciones, en las paradas de autobuses, trenes o Metro (Herrera, 2008).

Los SAIV pueden proporcionar información, servicios de tránsito y tráfico a la población, por medio de algoritmos de planificación de rutas y mapas digitales. Este tipo de servicios se apoyan en el uso de páginas web por las cuales el usuario puede consultar información, por ejemplo consulta de información de tráfico y así crear consultas de rutas.

Figura 2-1 Panel de disponibilidad del estacionamiento

Los SAIV permiten tomar decisiones sobre el viaje que se debe realizar, por ejemplo cuál es la mejor ruta para llegar al destino usando un vehículo o qué combinación de transportes públicos se deben realizar y cuánto es el costo.

Para llevar a cabo las tareas de recolección de información, procesamiento y entrega al usuario, los SAIV utilizan tecnología avanzada. La información es recolectada de diversas fuentes, por ejemplo; los Centros de Administración del Transporte que recolectan información sobre carreteras o puentes con cámaras y sensores, Centros Meteorológicos, páginas amarillas, oficinas de turismo, información estadística, etc. Los SAIV procesan toda esa información que reciben de modo de poder integrarla, almacenarla y entregarla al usuario (Giosa & Viera , 2006). En la Figura 2-2 se puede observar un esquema básico de la estructura de un sistema SAIV.

Los SAIV están dirigidos a dos tipos de servicios:

- A los automovilistas se les brinda rutas entre dos o más puntos, información de tráfico, alertas de incidentes, etc.
- A los peatones que usan el transporte público les proporciona información sobre modos de transporte existentes, costos y tiempo de viaje entre otros.

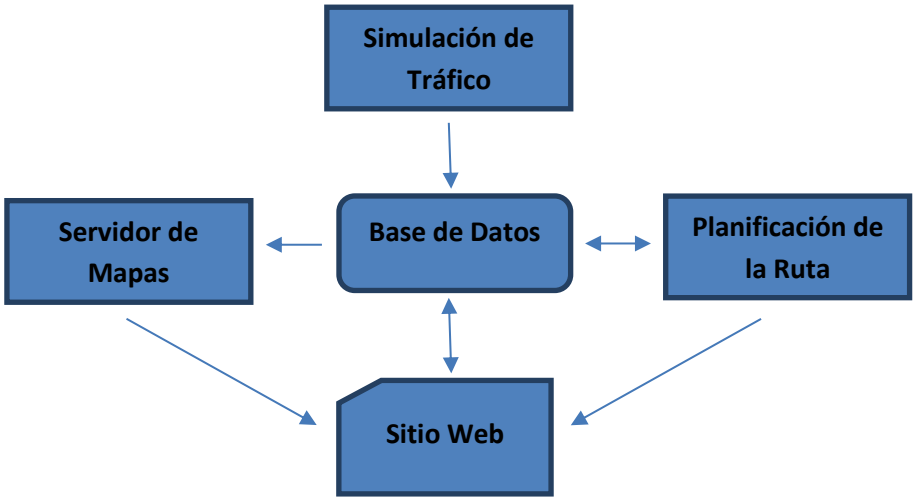


Figura 2-2. Arquitectura Básica de un SAIV
Fuente: (Giosa & Viera , 2006)

Los SAIV son una herramienta altamente utilizada en diferentes partes del mundo, la cual ha ayudado a resolver graves problemas de tráfico, se mencionan algunos ejemplos en la sección 2.4.1. En México existen aplicaciones muy sencillas de SAIV, como se describe en la sección 0, son de difícil acceso ya que no hay difusión adecuada al público en general.

Sistemas Adaptativos para el Control de Tráfico

Los ATCS (Adaptative Traffic Control Systems), se basan en una computadora que mediante información de tráfico que llega desde sensores instalados, puede proveer control y ajustes automáticos a señalamientos de tráfico de acuerdo a las demandas evaluadas.

Los ATCS pueden proporcionar coordinación de semáforos para que cambien de manera eficiente en base a las condiciones de tráfico y maximizar el flujo de tráfico. Los ATCS utilizan los sensores instalados en la infraestructura y mediante algoritmos ajustan la frecuencia de la señal para dar soporte a la demanda actual.

Sistemas Avanzados para el Control de los Vehículos

Los **AVCS** (Advance Vehicle Collision Systems), son sistemas que aplican tecnologías avanzadas en vehículos y carreteras, y ayudan a los conductores a controlar sus vehículos con el fin de reducir accidentes y mejorar la seguridad del tráfico. El AVCS incluye principalmente notificaciones de alerta y control anti-colisión, asistencia al conductor, control lateral y longitudinal automático, y los planes a largo plazo de la conducción automática y de sistemas automáticos de carreteras (CINTEL, 2010).

De acuerdo con Benítez (2001), los AVCS sistemas recurren a los recursos tecnológicos de frenado por radar, control de velocidad de crucero dependiendo de las condiciones prevalecientes del tráfico en una vía rápida, control de tracción como se muestra en la Figura 2-3.

Mediante la operación de los AVCS se puede tener una reducción de accidentes, lo cual genera mayor seguridad para el usuario.

Los AVCS ofrecen seguridad al usuario, lo que genera mayor confort, es importante dejar claro que los AVCS solo son herramientas auxiliares y no debe subvalorarse ante los reflejos del usuario, el usuario corre el riesgo que al sentirse cada vez más seguro debido a la implementación estos sistemas y altere su comportamiento provocando a su vez accidentes por descuido.

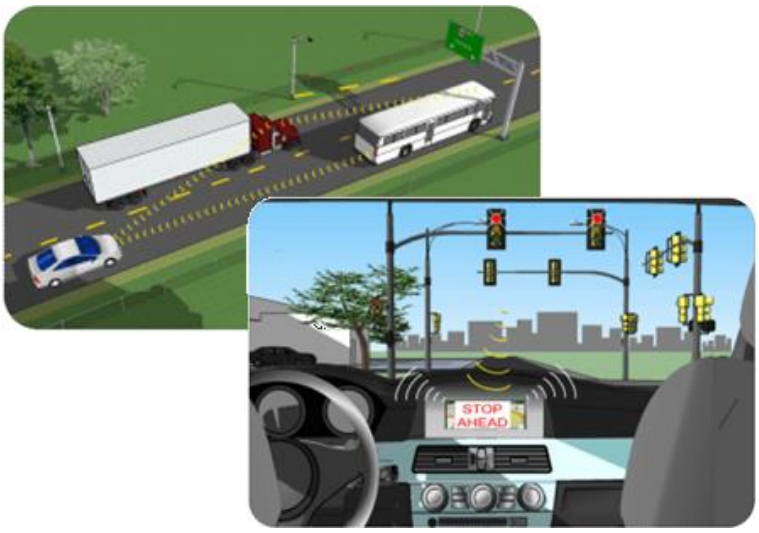


Figura 2-3 Conectividad e información dentro del vehículo (Benitez, 2001).

Sistema de Gestión de Flotas

Los **FMS** (*Freight Management Systems*) están diseñados para mejorar la confiabilidad, calidad de servicio y eficiencia del transporte de carga. Los FMS ofrecen un mejor control en operaciones de flotas a través de seguimiento e identificación del vehículo, programas computarizado y comunicación mutua (Button & Hensher, 2001).

Operaciones de Vehículos Comerciales

Los **CVO** (Commercial Vehicle Operations) aplican las tecnologías SIT de ATMS, SAIV y AVCS en la operación vehículos comerciales, tales como camiones, buses, ambulancias y taxis con el fin de mejorar la eficiencia y la seguridad. Los sistemas CVO incluye principalmente el control automático de vehículos, la gestión de la flota, equipos de programación y pago electrónico (CINTEL, 2010).

Sistemas Avanzados de Transporte Público

Los **ATPS** (*Advance Transport Public Systems*) ayudan a disminuir los tiempos de desplazamiento y las distancias recorridas y a incrementar la seguridad, el confort y el conjunto de servicios que pueden ser ofrecidos a usuarios y clientes. Estos sistemas aplican la tecnología de ATMS, SAIV y AVCSS con el fin de mejorar la calidad del servicio, y aumentar la eficiencia y el número de personas que hacen uso, por ejemplo del transporte público (Figura 2-4) (CINTEL, 2010). Estos sistemas incluyen principalmente equipos de programación, boletos electrónicos y Vigilancia Automática de Vehículos (VPS, Vehicle Positioning Systems) que utilizan un sistema autónomo de posicionamiento como por ejemplo el GPS (Global Positioning Systems) para localizar el vehículo.

Figura 2-4 Ejemplo de APTS (US-DOT, 2011)

Gestión de Emergencia

Los **EMS** (*Emergency Management Systems*) operan cuando el vehículo afectado envía su posición al centro de emergencias y a la policía, disminuyendo los tiempos de respuesta. Esta área responde a los incidentes y emergencias para la identificación de problemas, decisiones sobre respuestas apropiadas y recursos y gestión de la situación (McQueen & Mc Queen, 1999). Los incidentes abarcados pueden ser para alerta de fuego o llamar a los servicios de policía, ambulancias y patrullaje

Cobro Electrónico de Peajes

Los **ETC** (*Electronic Toll Collection Systems*), ayudan a captar nuevos usuarios, reducción de fraude, tiempo de viaje más rápido fomentan el uso de transporte público y pueden conseguir reducir costos por operación.

Los ETC son capaces de realizar un cargo de manera electrónica de una tarifa determinada a la cuenta de un usuario, pueden determinar cuándo un vehículo registrado puede pasar realizando el cargo automáticamente a esos vehículos, lo que permite que los vehículos pasen alguna caseta sin detener completamente el vehículo.

Los servicios que pueden ofrecer los ETC incluyen operación en de casetas cobro, casetas de cobro en estacionamientos y todos servicios de SIT involucrados en el proceso de pago de peajes o tarifas para servicios del transporte (McQueen & Mc Queen, 1999).

Sistema de Guías de Rutas

Los **ROG** (*Route Options Generator*) proporcionan navegación, información guía por rutas e información de planeación de viaje. La información puede ser desplegada por medio de pantallas digitales o por medio de síntesis de voz, la cual va indicando las instrucciones del trayecto (Button & Hensher, 2001), los ROG presentan diferentes alternativas:

- Ruta guía en el Vehículo: Proveen información cuando el viajero se encuentra en el automóvil
    - ✓ Asistencia remota de un operador
    - ✓ Por teléfono celular
    - ✓ Requiere una subscripción

- Ruta guía fuera del vehículo: Puede ser un mapa o consulta en internet con instrucciones paso a paso sobre un trayecto
- Sistema de ruta Autónoma: Proveen información suplementaria por medio de software
    - ✓ Equipo instalado en el vehículo
    - ✓ Dispositivos móviles
    - ✓ Combina servicios de emergencia
- Sistema completamente integrados con la infraestructura: Proveen información basada en la influencia de condiciones la vía y de tráfico
    - ✓ Sistema Guía de rutas Dinámicas
    - ✓ Requiere implementación de sensores
- Basados en operador: Los fabricantes de vehículos ofrecen servicio de ruta basado en operadores
    - ✓ La localización es enviada por el vehículo
    - ✓ Llamadas telefónicas con operadores que dan indicaciones
- Sistemas autónomos: No requieren operador humano y usan software, mapas, bases de datos para calcular la ruta adecuada

Sistema Avanzado de Gestión de Estacionamientos

En cuanto la gestión de estacionamientos se encuentran los **APMS** (*Advance Parking Management Systems*), que pueden ofrecer información al usuario la disponibilidad de estacionamientos que se encuentran en la zona mediante mapas impresos o digitales para planear los viajes . Estos anuncios pueden ser consultados vía web donde se puede desplegar información de ubicación del estacionamiento, horario de operación, capacidad, costo y formas de pago como se muestra en la Figura 2-5.

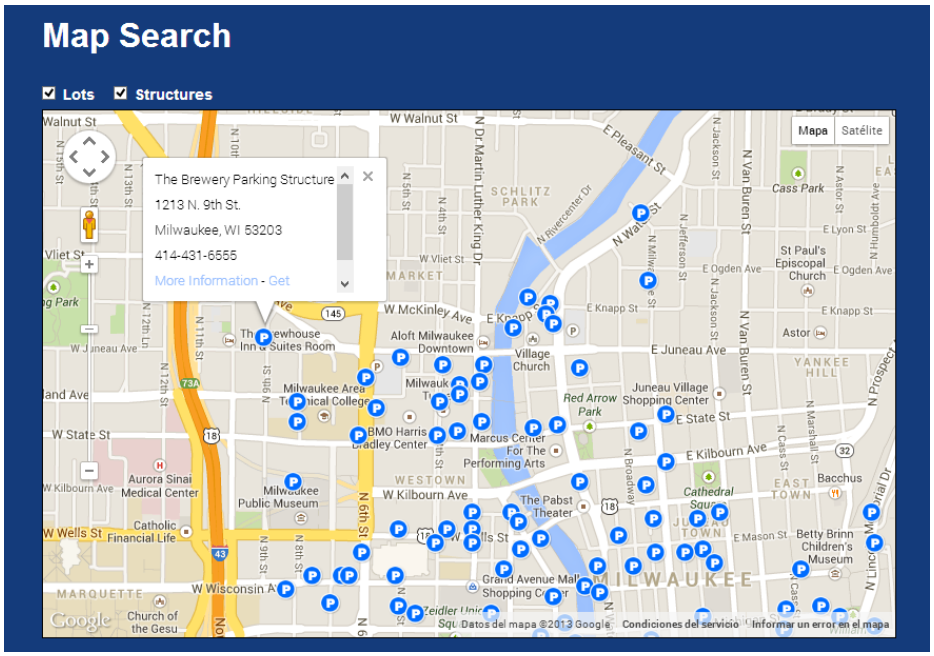


Figura 2-5 Ubicación de estacionamientos disponible en ParkMilwaukee.com

De acuerdo con US-DOT (2007) puede haber señalizaciones de estacionamientos pasivos y activos. Los pasivos solo cuentan con indicaciones mediante señalamiento horizontal y tableros en lugares cercanos a los estacionamientos, y los componentes activos complementan a los pasivos, ya que pueden ser tableros de leyenda variable que indiquen al viajero la dirección de un estacionamiento así como los espacios disponibles (Figura 2-6)

Figura 2-6 Señal que indica ubicación y capacidad de estacionamientos en Chicago (US-DOT, 2007)

Los APMS han operado en Europa y Japón desde los setentas reduciendo la congestión, el impacto ambiental, y la frustración asociada al conductor por tratar de encontrar estacionamiento en centros de ciudades. También son implementados tableros de leyenda variable dentro de estacionamientos como son los centros comerciales o estacionamientos de aeropuertos (Figura 2-7), en estos tableros se puede indicar al conductor si algún pasillo cuenta con lugares disponibles, si la fila está saturada o en su defecto si el nivel no cuenta con plazas disponibles. Con la disposición de esta información, el conductor puede tomar mejores decisiones y puede reducir el tiempo para estacionarse.

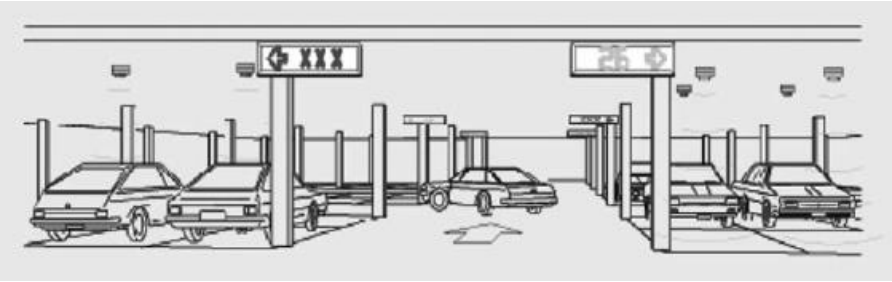


Figura 2-7 Ilustración de disponibilidad de estacionamientos (US-DOT, 2007)

La Figura 2-8 muestra un mapa esquemático de un sistema APMS funcional para una red vial de una ciudad; se posicionan los tableros de información variable en lugares estratégicos, que pueden ser localizados sobre calles principales y calles arteriales, esto permite que el APMS pueda operar y dar información a los viajeros para una planificación de viajes adecuada en la red.

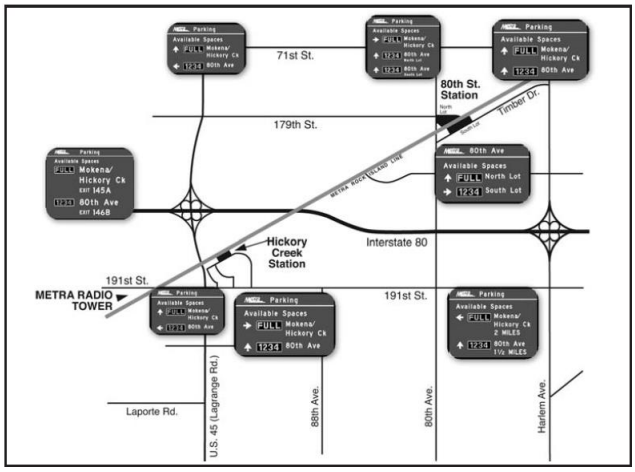


Figura 2-8 Ilustración de la red con información de estacionamientos

2.4 Ejemplos de aplicaciones SIT

En este apartado se describen algunos ejemplos de implementaciones de SIT que existen en diferentes Regiones del Mundo, con el fin de mostrar cuales son y han sido los beneficios obtenidos por los SIT y que tan extenso es su campo de aplicación. Finalmente se mencionan ejemplos de implementaciones SIT en México para evaluar el desarrollo de estas tecnologías en nuestro país.

2.4.1 Ejemplos de aplicaciones SIT en ciudades Mundo

Se enuncian ejemplos de implementaciones de SIT en las ciudades como Estocolmo, California, Quebec, Londres, Singapur, España, Bogotá y Reino Unido donde se describe que técnica han implementado y que beneficios se obtienen de ellas.

Estocolmo y Londres

Estocolmo es una de las ciudades más accesibles del mundo y considera que su sistema de transporte es esencial para conseguirlo, implemento un impuesto de congestión, que redujo el uso del automóvil un 25% y las emisiones de gases contaminantes un 14%.

El impuesto de congestión es cobrado a todos los vehículos entrando y saliendo del centro de la ciudad de Estocolmo, Suecia el cual se implementó en el año 2007. Los vehículos que ingresan a las zonas restringidas pagan automáticamente al entrar. Estocolmo ha creado este impuesto como parte de un plan de transporte holístico que también ha incrementado los servicios del transporte público como el autobús y los grandes estacionamientos. Además, dispone de un sistema de boletos integral que enlaza los principales modos de transporte (Houghton, et al., 2009).

La ciudad de Estocolmo también cuenta con sistemas de información a usuarios en el ámbito del transporte conocido como Storstockholms Lokaltrafik (SL), que es una pequeña organización que desarrolla nuevas soluciones para los sistemas de transporte público. Se puede acceder a esta información mediante un explorador web (Figura 2-9); así mismo cuenta con aplicación para teléfonos móviles con conexión a internet para consultar estacionamientos, congestionamientos viales, condiciones del clima, opciones de viaje en transporte público, etc.

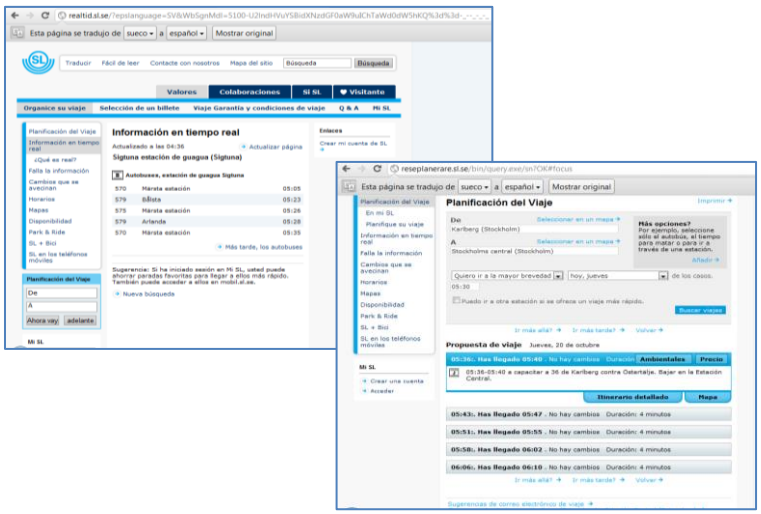


Figura 2-9. Sistema de Información en tiempo real (SL, 2011).

El sistema de transporte de Estocolmo permite consultar la información en tiempo real acerca del transporte público y así poder planear de mejor manera las rutas y traslados que realicen los usuarios. Cuenta con sistema de tarjeta inteligente (Figura 2-10) con el cual se puede realizar el pago en los diferentes modos de transporte púbico ya sea Metro, autobús o trenes.

Figura 2-10. Tarjeta Prepago SL (SL, 2011).

De acuerdo con Houghton et al (2009) en la ciudad de Londres también se ha implementado el impuesto de congestión, lo que ha aumentado la popularidad del autobús. Londres ha tenido mucho éxito a la hora de cambiar las tendencias de los usuarios y animarles a utilizar

más el autobús, con un incremento del 40% desde 1999 y un cambio modal del 4% con respecto a los vehículos privados.

Esto ha sido posible gracias a iniciativas específicas que incluían ampliación de servicios del transporte público, mejores horarios y conexiones, inversión en nuevos autobuses, una estructura tarifaria y métodos de pago más sencillos. El cambio ha sido mayor en el centro de Londres, con el apoyo de impuesto de congestión y medidas que dan prioridad a los autobuses (Houghton, et al., 2009).

De los ejemplos descritos en la ciudad de Estocolmo se pueden encontrar en operación los SIT que se mencionan en la Tabla 2-9.

Tabla 2-9 Ejemplos de áreas SIT que se encuentran operando en la ciudad de Estocolmo

Sistema SIT aplicadas	***Observaciones***
SAIV	Se presentan sistemas que ofrecen información al usuario como son las páginas web para consultar el servicio de transporte público, estacionamientos y obtención de rutas.
APTS	Las unidades de transporte público cuentan con Vigilancia Automática de Vehículos
ETC	El pago es automático al ingresar a la zona restringida y el transporte público hace uso de sistemas de pago electrónico.
EMS	El transporte público puede enviar su posición en tiempo real en caso de un accidente o avería.

California, E.U.A y Quebec, Canadá

Un sistema de Información al viajero opera en California E.U.A. y es conocido por el nombre de ATIS/511, opera a nivel interurbano y entrega información en tiempo real a conductores como alertas de emergencia por accidentes, congestionamientos, alertas de huracanes, esta información permite a los usuarios planear sus rutas de viaje. Los organismos públicos utilizan el número de teléfono 511, el sitio web en internet (www.511.org), señales de mensajes variables en tableros, etc. En la Figura 2-11 y Figura 2-12 se muestran pantallas del sitio web 511 donde se aprecian algunas de las opciones de rutas y alertas que se manejan.

En el portal web del Departamento de Transporte de California también permiten consultar imágenes tomadas por cámaras instaladas en puntos importantes de las vialidades (Figura 2-13).

En Quebec, Canadá, también se ha implementado el servicio ATIS/511, se puede acceder en la página web de Transporte de Quebec que presenta los mismos servicios que se describen en la página web de 511 de California (Figura 2-14).

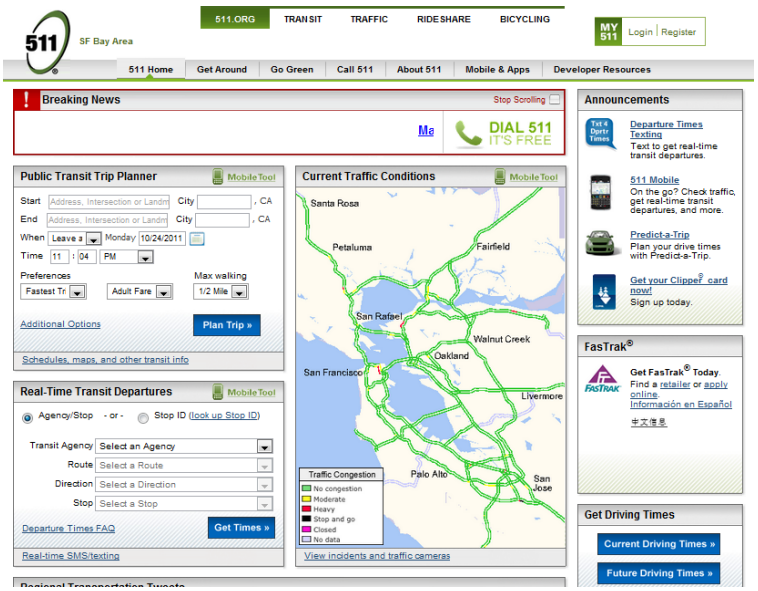


Figura 2-11. Planificador de rutas de página web 511 (511 by area, 2011)

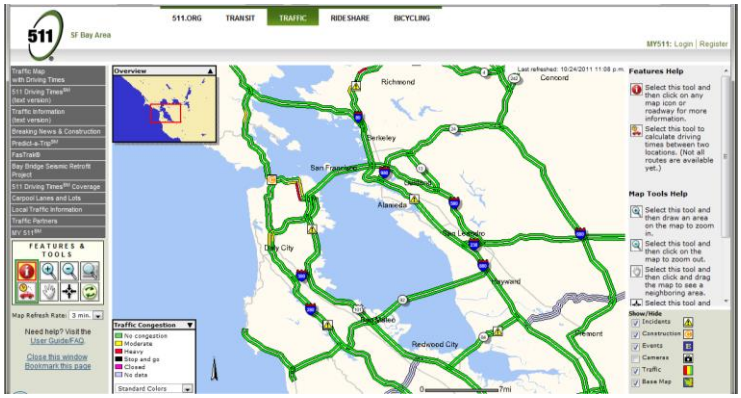


Figura 2-12. Mapa alertas en carreteras de California (511 by area, 2011)

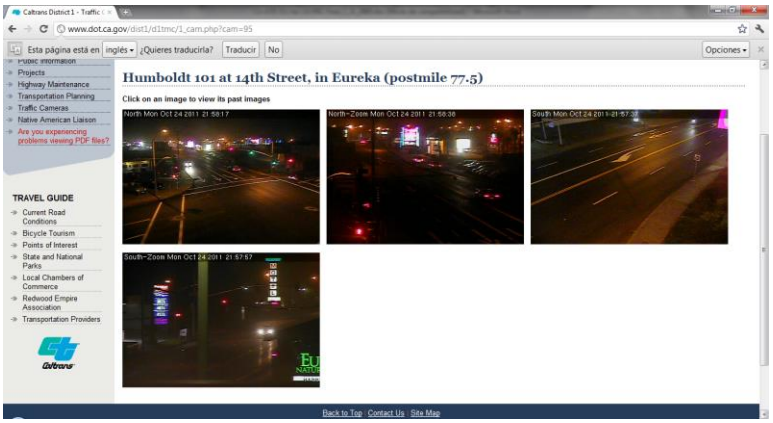


Figura 2-13. Vista del tráfico de California por medio de cámaras instaladas (511 by area, 2011)

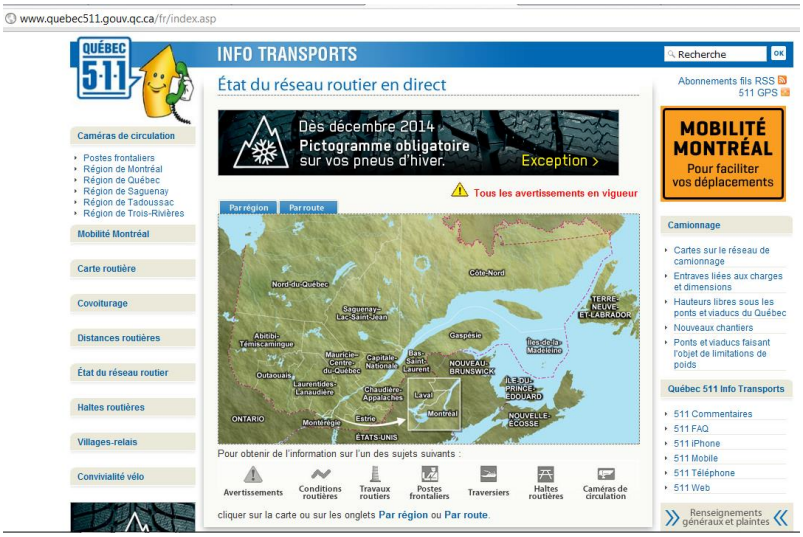


Figura 2-14. Página web Transports Quebec (Anon., 2011)

En el 2008 se reportó Transports Quebec (2011) que el servicio 511 está disponible para Estados Unidos y Canada, existen 43 servicios 511 disponibles para el viaje en transporte público operando en 33 estados y 2 provincias de Canadá.

De los ejemplos descritos se pueden encontrar en operación los SIT que se mencionan en la Tabla 2-10.

Tabla 2-10 Ejemplos de SIT operando en la ciudad de California E.U.A.

Sistema SIT aplicadas	***Observaciones***
SAIV	El servicio 511 ofrecen información al usuario como son las páginas web para consultar el flujo de tráfico en vialidades, incidentes, y tramos en obra
EMS	Mediante el uso de cámaras se pueden detectar accidentes en las vialidades.
ROG	Dentro de los servicios se encuentra el de poder trazar rutas desde un origen a un destino.

Singapur

Un buen ejemplo de prestación de servicios integrados es el sistema de pago electrónico multimodal de última generación denominado "Symphony for e-Payment". Partiendo del estándar de pago con monedero electrónico sin contacto (CEPAS, Contactless E-Purse Application Standard), un estándar abierto para la tarjeta de transporte de uso nacional, el sistema permite utilizar tarjetas con almacenamiento de valor multiuso (MPSV, por sus siglas en inglés) para el transporte (autobús, ferrocarril, impuesto de congestión, etc.). Además incluye soporte para varios emisores de tarjetas (compatibles con CEPAS), aumentando la libertad de elección y comodidad del usuario (Houghton, et al., 2009).

Parte de la información que ofrece su sistema de información es ocupación de estacionamientos, información de rutas de autobuses y Metro y actualizaciones sobre el clima.

Singapur cuenta con una aplicación para dispositivos móviles con la cual los usuarios de transporte público obtienen información en tiempo real por medio de mensajes de texto (Figura 2-15), esta información puede ser sobre horario de llegada de los autobuses, información sobre rutas, localización estaciones cercanas, marcación rápida a taxis y mapas interactivos para la planeación de viajes.

Figura 2-15. Mensajes de texto en tiempo real de información de llegada de los autobuses (Singapore Autority Land Transport, 2011)

Los automovilistas pueden acceder a la guía de estacionamientos cercanos con información sobre espacios disponibles la cual se actualiza en tiempo real, puede ver imágenes en vivo de las cámaras de los semáforos de la calle que desee, puede consultar noticias de tráfico, así como, lugares de incidentes, como se muestra en la Figura 2-16. Además el usuario puede consultar los horarios de llegada de los trenes.

Figura 2-16. Sistemas de información para automovilistas (Singapore Autority Land Transport, 2011)

Éste es uno de los ejemplos de SAIV de aplicación más amplia del cual se hace referencia en esta tesis, la cual integra al usuario con el transporte público.

De los ejemplos descritos se pueden encontrar en operación los SIT que se mencionan en la Tabla 2-11

Tabla 2-11 Ejemplos de SIT operando en la ciudad de Singapur

Sistema SIT aplicadas	***Observaciones***
SAIV	Se ofrece información a los usuarios por medios tableros digitales o dispositivos móviles.
APTS	El sistema de transporte público implementa sistemas de cobro así como información a usuarios.
ETC	El sistema de transporte dispone de métodos de pago mediante tarjeta son contacto.
EMS	Se ofrece información a usuarios sobre incidentes que se presenten, así mismo se puede llamar a servicios de emergencias.
APMS	Existe información disponible acerca de estacionamientos y su capacidad disponible.

España

En España, en conjunto con INDRA, que es una compañía global de consultoría y desarrollo de tecnología en el ámbito de Transporte y Tráfico, Energía e Industria, Administración Pública y Sanidad, Servicios Financieros, Seguridad y Defensa y Telecom y Media, ha implementado el sistema Da Vinci: Sistema de Gestión de Transito Ferroviario, es un sistema de gestión ferroviaria completamente integrado, ha tenido resultados satisfactorios en entornos de alta velocidad, velocidad convencional, tráfico de vía estrecha, suburbano y Metro.

En distintas ciudades de países como Argentina, Alemania, Reino Unido, Noruega INDRA ofrece servicios de sistemas de control en tiempo real de autobuses, tranvías, Metros o

ferrocarriles (Figura 2-17), pasando por los medios de pago automático en una terminal de viajeros, estación o parada (INDRA, 2011).

Figura 2-17. Centro de control Ferroviario
Fuente: (INDRA, 2011)

Tabla 2-12 Ejemplos de SIT operando en España

Sistema SIT aplicadas	*Observaciones*
CVO	Se pueden encontrar sistemas de control automático de vehículos como trenes, gestión de la flota, y equipos de programación.
ETC	INDRA maneja sistemas de pago electrónico para el servicio de transporte publico
EMS	Con los sistemas de control se permite tener notificaciones a servicios de emergencia.

Bogotá

En Bogotá se comienza a implementar un SIT, con 40 cámaras instaladas en sitios estratégicos para detectar infractores de tránsito y 60 cámaras más para monitorear el tráfico en la ciudad. Otras seis cámaras de video móviles supervisan las obras que se desarrollan en la ciudad (Houghton, et al., 2009).

Houghton et al (2009), también menciona que habrá, adicionalmente, nuevas intersecciones con semáforo y paneles electrónicos desde donde se tendrá toda la información sobre el tráfico y se instalarán pasos peatonales en intersecciones existentes y elementos de paso seguro para invidentes.

De los ejemplos descritos se pueden encontrar en operación los SIT que se mencionan en la Tabla 2-13

Tabla 2-13 Ejemplos de SIT operando en Bogotá

Sistema SIT aplicadas	*Observaciones*
SAIV	La información descrita del SIT ofrece información al usuario acerca del tráfico
EMS	El sistema de cámaras instaladas permite tener notificaciones a servicios de emergencia.

Reino Unido

McQueen y McQueen (1999), mencionan que desde 1998 en Reino Unido opera el Trafficmaster, un sistema privado que ofrece localización de flotas, gestión de flotas y la navegación bajo seguimiento por satélite. Este sistema envía información a sus suscriptores y da información dentro del vehículo mediante sistemas de síntesis de voz. Puede ofrecer información de alertas de congestión de tráfico con un radio de diez millas, suficiente para que el conductor pueda establecer decisiones para tomar rutas alternativas (McQueen & Mc Queen, 1999).

Figura 2-18 Dispositivo de rutas GPS (Anon., 2011)

El Sistema Trafficmaster actualmente sigue en operación y hace uso de las nuevas tecnologías como aplicaciones para PDA's y pantallas táctiles (Figura 2-18), cuenta con navegación por satélite y la información de tráfico en tiempo real para determinar la mejor ruta.

Los datos que utiliza el Trafficmaster provienen de una la red única de 5.200 sensores de tráfico que cubre el 100% de las autopistas del Reino Unido y el 95% de las carreteras troncales (falta sujeto y complemento).

El director de la flota también puede ofrecer a los usuarios nuevas capacidades para seguir la ubicación de varios vehículos en una vista en mosaico como se muestra en la Figura 2-19 (Anon., 2011).

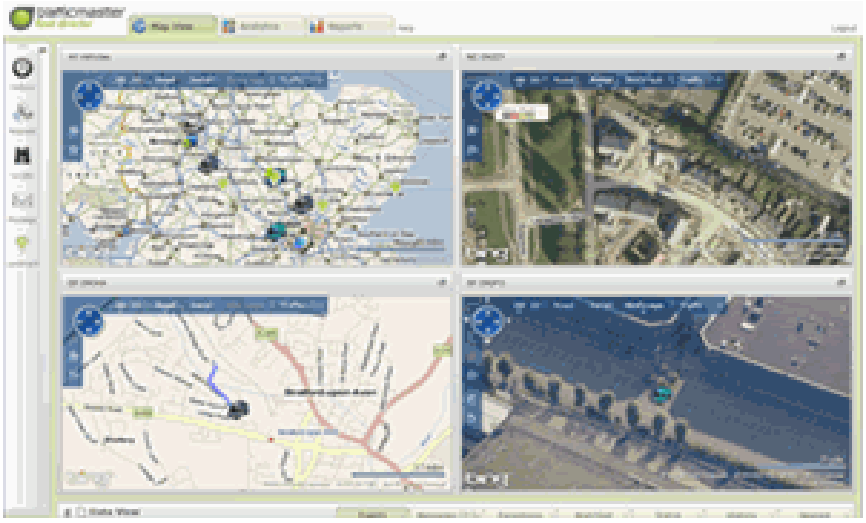


Figura 2-19 Software de gestión de flotas (Anon., 2011)

De los ejemplos descritos se pueden encontrar en operación los SIT que se mencionan en la Tabla 2-14

Tabla 2-14 Ejemplos de SIT operando en Reino Unido

Sistema SIT aplicadas	*Observaciones*
FMS	Permite gestionar las flotas de carga para llevar un mejor control de los vehículos que se tienen a disposición
ROG	El sistema permite a un operador proporcionar datos de navegación, información guía por rutas e información de planeación de viaje

Fronteras de Estados Unidos

En el Departamento de Transporte de los Estados Unidos (RITA, U.S. Departament of Transportation Research an Innovate Tecnology Administration) se cuenta con la iniciativa conjunta la cual se centra en el uso de SIT para crear cruces fronterizos más seguros con Canadá y México.

En la frontera México-Estados Unidos, existe el proyecto de colaborar y apoyar el desarrollo de un plan para un sistema de tarifas dinámicas. Actualmente el California Department of Transportation (Caltrans), la Asociación de gobiernos de San Diego (SANDAG), y agencias mexicanas están planeando un tercer cruce fronterizo para reducir las demoras causadas por congestión de tráfico, lo que permitirá una mejor adaptación de los viajes comerciales y las oportunidades de trabajo a ambos lados de la frontera sin sacrificar la seguridad fronteriza (US-DOT, 2011).

Figura 2-20 Cruce Fronterizo (US-DOT, 2011)

Las implementaciones SIT que se contemplan en el plan mencionado son, instalar sistemas electrónicos para cobro de peaje, monitorear el tiempo de espera en la frontera, instalar sistemas de control de precios variables de tarifas para reducir los tiempos de espera, mejorar los sistemas de seguridad en las garitas de la frontera México – Estados Unidos para reducir los tiempos de inspección y proporcionar información al viajero sobre el tráfico y tiempos de espera en el cruce fronterizo. Este cruce fronterizo será el primer proyecto internacional de América del Norte (Figura 2-20).

De los ejemplos descritos se pueden encontrar en operación los SIT que se mencionan en la Tabla 2-15

Tabla 2-15 Ejemplos de SIT operando en la frontera México -Estados Unidos

Sistema SIT aplicadas	***Observaciones***
SAIV	Se pretende ofrecer información al usuario para la toma de decisiones en sus viajes
APTS	Las unidades de transporte público cuentan con Vigilancia Automática de Vehículos
ETC	El sistema contemplado cuenta con casetas de pago automatizado.
EMS	El monitoreo del cruce fronterizo permitirá una reacción rápida ante las emergencias

En la frontera entre Estados Unidos y Canadá, el Departamento de Transporte de EE.UU. apoya el desarrollo de un plan detallado para la ejecución del Cruce Fronterizo Internacional - Sistema de Control Electrónico (IBC E-Screening) para camiones, coches automotores y autobuses (Figura 2-21). El “IBC E-Screening” es un sistema de alerta que permitirá el cruce de manera segura y legal de mercancías y pasajeros en el norte y el sur de las fronteras de Estados Unidos (US-DOT, 2011).

Visión en carretera inteligente

1. Sitio E-Screening
2. E-Tolling
3. Detección de Sobrepeso
4. Estación de Monitoreo de Clima
5. Lector de Transponedor
6. Pesaje en Movimiento
7. Detector de Bucle
8. Monitoreo In-Vehicle (En movimiento)
9. Verificación E-Permitting
10. Sistemas de detección de radiación

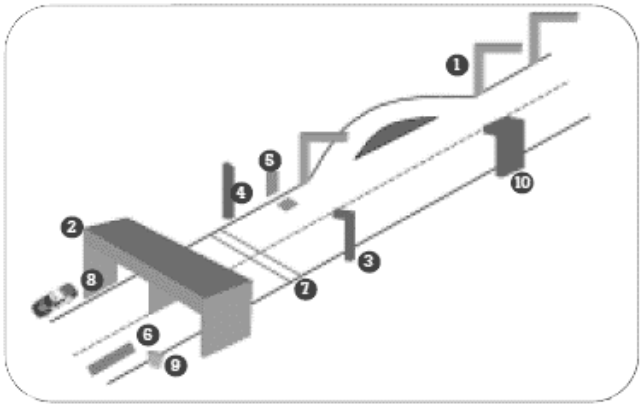


Figura 2-21 Carretera Inteligente
(US-DOT, 2011)

De los ejemplos descritos se pueden encontrar en operación los SIT que se mencionan en la Tabla 2-16

Tabla 2-16 Ejemplos de SIT operando en la frontera Estados Unidos - Canadá

Sistema SIT aplicadas	***Observaciones***
ATMS	El sistema permite llevar una gestión de los vehículos que pasan con lo que se puede alertar o controlar si alguna parte del proceso entra en conflicto para mejorar el flujo vehicular.
ETC	Permite pago de tarifas electrónicas automatizadas.
EMS	Permite solicitar servicios de emergencia.

2.4.2 Ejemplos de aplicaciones SIT en México

En México principalmente se han encontrado implementaciones de SIT en el ámbito carretero en cuanto a gestión de autopistas y cobro electrónico de tarifas en casetas de cobro. Sin embargo también se han identificado implementaciones en el ámbito urbano, que funcionan solo para el control del sistema de tráfico, dejando de lado la integración con otros servicios de información que pudiera tener el usuario.

Centro de control de tráfico

La Ciudad de México cuenta con un Centro Adaptativo de Control de Tráfico en el cual está a cargo la Secretaría de Seguridad Pública del Gobierno del Distrito Federal. Este centro opera los 365 días del año.

Para el funcionamiento de este centro de acuerdo con Benítez (2001), se cuenta con 200 km de fibra óptica, 60 enlaces de microondas, 1000 sensores tipo bucle de tráfico (Traffic

Loop) bajo el pavimento en distintas intersecciones, sensores de microondas instalados en los postes de semáforos los cuales proporcionan datos sobre el flujo vehicular, 172 cámaras de Circuito cerrado de televisión (CCTV) instaladas en parte de la ciudad, 2 cámaras instaladas en helicópteros, 20 señales dinámicas conectadas al centro de control vía modem.

Tiene una sala principal que cuenta con 16 pantallas gigantes LCD, 8 pantallas LCD para desplegar video de monitoreo de la ciudad y se cuenta con la capacidad de realizar grabación digital de las imágenes captadas por las cámaras de CCTV (Benitez, 2001). El control de tráfico no se realiza de manera automática mediante algoritmos y el funcionamiento de sensores, si no de manera manual por medio de interpretación humana.

A pesar de que originalmente fueron instalados estos equipos en la actualidad, por falta de mantenimiento han ocasionado una degradación del equipo.

- Las ciudades de León, Gto., Monterrey, NL., Guadalajara, Jal. Y Aguascalientes, Agu., al igual que la Ciudad de México, cuentan con un centro computarizado de Control de Tráfico de características similares al implantado en la Ciudad de México

De los ejemplos descritos se pueden encontrar en operación los SIT que se mencionan en la Tabla 2-18

Tabla 2-17 Ejemplos de SIT en la Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara y Aguascalientes

Sistema SIT aplicadas	***Observaciones***
ATCS	El sistema permite llevar una gestión de los vehículos que pasan con lo que se puede alertar, ajustar o controlar si alguna parte del proceso entra en conflicto para mejorar el flujo vehicular (no funciona automáticamente).
EMS	Permite solicitar servicios de emergencia (no funciona automáticamente).

Centro de Control de Mando del Metro de la Cd. de México

- El Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México cuenta con un centro de control de mando (Figura 2-22), el centro de control está integrado por equipos electrónicos, de control, de comunicaciones, de cómputo en un ambiente de redes y se encuentran distribuidos a lo largo de las instalaciones. Con estos centros de control se puede saber en tiempo real, si un tren envia una señal, en qué momento y da aviso sonoro de alguna eventualidad, lo que permite que los reguladores y el jefe de reguladores, en ese momento, puedan efectuar una acción (SETRAVI-GDF, 2012).

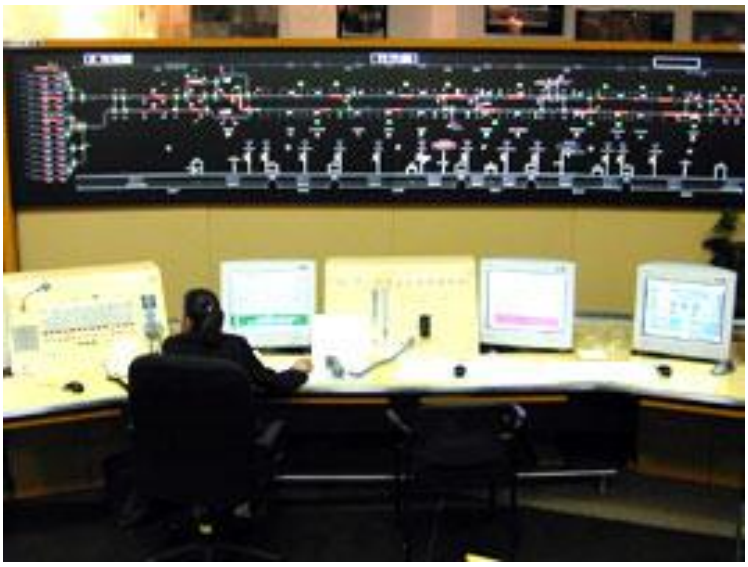


Figura 2-22 Centro de control de mando del Metro de la Cd de México (SETRAVI-GDF, 2012)

El centro del control del Metro también cuenta con un subsistema de optimización que, entre otras funciones, le indica al Sistema de Pilotaje Automático cual es la velocidad que deben desarrollar todos los trenes en las diferentes líneas del Metro y poder distribuir los trenes de manera más conveniente para beneficio de los usuarios (Figura 2-23).

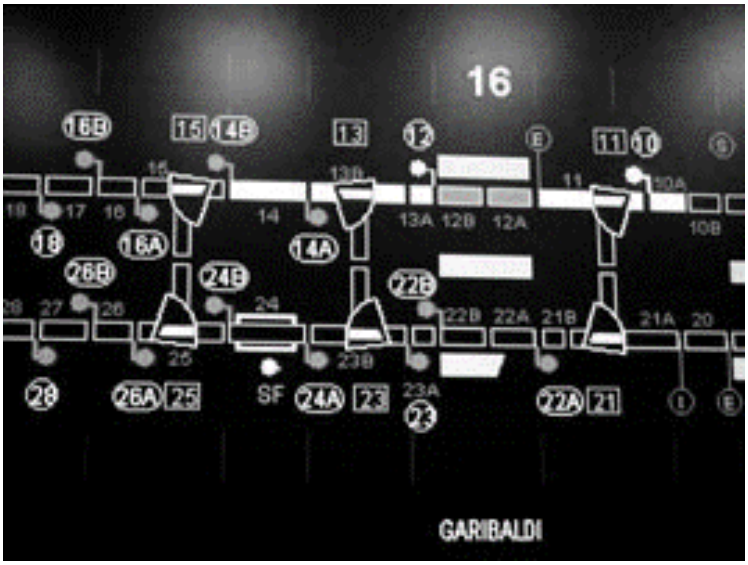


Figura 2-23 Tablero de Control del Metro de la Cd de México (SETRAVI-GDF, 2012)

El Metro también tiene implementado un sistema de cobro electrónico mediante tarjeta recargable, esta tarjeta puede ser utilizada tanto Metro como Metrobús y Tren Ligero.

De los ejemplos descritos se pueden encontrar en operación los SIT que se mencionan en la Tabla 2-18

Tabla 2-18 Ejemplos de SIT operando en el sistema Metro de la Ciudad de México

Sistema SIT aplicadas	*Observaciones*
ATCS	El sistema permite llevar una gestión de los vehículos que pasan con lo que se puede alertar, ajustar o controlar si alguna parte del proceso entra en conflicto para mejorar el flujo vehicular.
ETC	Permite pago de tarifas electrónicas automatizadas.
EMS	Permite solicitar servicios de emergencia.

Servicio de rutas punto a punto (SCT)

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) por parte de la Dirección General de Desarrollo Carretero cuenta con un servicio por internet de "Rutas Punto a Punto" (Figura 2-24), el cual estima distancia, tiempo, uso de combustible y costo total del viaje por pago de tarifas de casetas (en caso de usar caseta de cuota) entre dos puntos, indicando la ruta en un mapa digital (Figura 2-25). Este servicio considera el modo de transporte, ya sea automóvil, motocicleta, autobús, camión considerando número de ejes, etc.

Este servicio está orientado a viajes por carretera y autopistas de cuota, en el que suponen velocidades constantes y óptimas, por lo que solo ofrece información para estimar tiempos y costos generales por la red de autopistas y carreteras federales y estatales de México. La Figura 2-25 muestra una ruta trazada utilizando el servicio "Rutas Punto a Punto" donde se puede apreciar que solo se muestra la ruta encontrada y no la red carretera completa, lo cual puede servir al usuario como referencia para su ubicación y como se compone la red carretera.

Figura 2-24 Página web de Rutas Punto a Punto (SCT México, 2011)

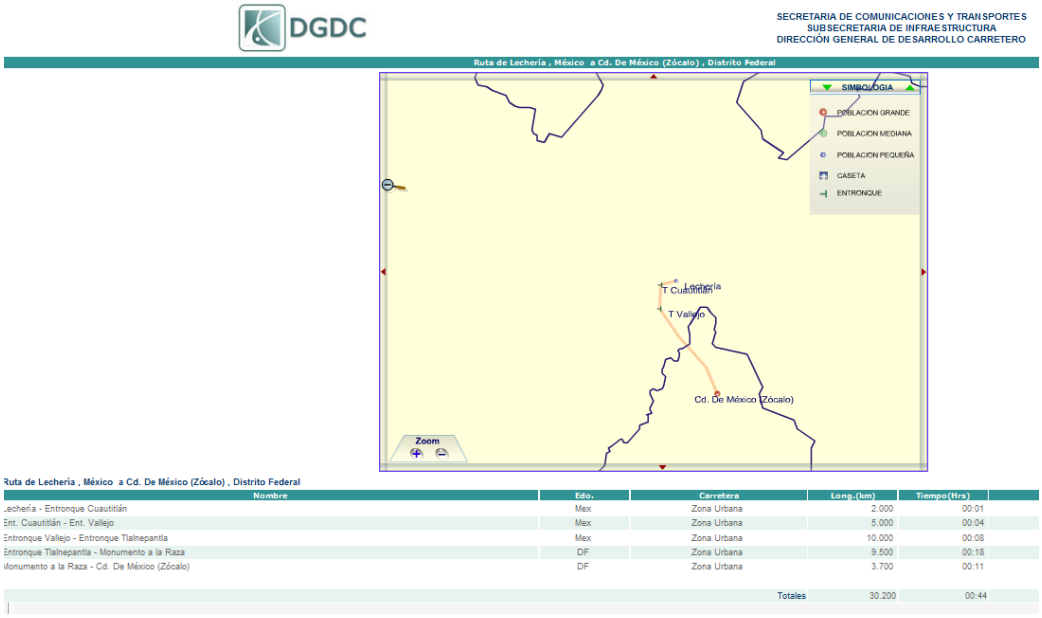


Figura 2-25 Informe de ruta de Rutas Punto a Punto (SCT México, 2011)

De los ejemplos descritos se pueden encontrar en operación los SIT que se mencionan en la Tabla 2-19.

Tabla 2-19 Ejemplos de SIT ofrecido por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes

Sistema SIT aplicadas	***Observaciones***
SAIV	El sistema permite al usuario consultar información acerca de su ruta así como costos incurridos por de uso de la autopista

SIT en autopistas y carreteras de México

En la autopista Arco Norte, así como la autopista Mazatlán - Culiacán se ha implementado la plataforma SIT de America Resourses que es una empresa privada que trabaja en integración de tecnologías y Sistemas Inteligentes de Transporte. La plataforma SIT implementada incluye la instalación de una de red basada en fibra óptica a lo largo de toda la autopista y conectada con el Centro de Control y Operaciones (CCO), e instalación de cámaras y tableros de información dinámica. Esta autopista también cuenta con pago electrónico automatizado en las casetas de cobro.

Mediante las cámaras el CCO puede monitorear el estado de la autopista y administrar los incidentes ocurridos para llevar un registro y atenderlos dependiendo del tipo de evento. Los tableros de información dinámica los usuarios son informados en tiempo real sobre las condiciones de tránsito, mantenimientos y otras eventualidades para que así puedan

tomar decisiones oportunas en su camino y prevenir accidentes. El sistema también incluye una plataforma web donde se puede consultar rutas y tiempos de viaje.

Figura 2-26 Obtención de rutas, implementación de sistema SIT (Americas Resources, 2013)

De los ejemplos descritos se pueden encontrar en operación los SIT que se mencionan en la Tabla 2-20.

Tabla 2-20 Ejemplos de SIT operando en autopistas concesionadas

Sistema SIT aplicadas	***Observaciones***
SAIV	El sistema permite al usuario consultar información acerca de su ruta así como costos incurridos por de uso de la autopista
ETC	Permite pago de tarifas electrónicas automatizadas.

En este capítulo se ha dado un panorama de los SIT y como pueden funcionar como herramienta complementaria para gestionar el tráfico en caso de propuestas de transporte sustentable de los que se trató en el capítulo 1, combinando medidas restrictivas para automóviles e implementando servicios de información que ayuden al viajero a tomar mejores decisiones.

Como puede observarse en los ejemplos presentados, en diferentes partes del mundo, la mayoría de los países desarrollados y algunos en vías de desarrollo implementan los SIT para tener un mejor control del tráfico y ofrecer información del el transporte público, tener mejores estándares de movilidad y sin congestionamientos viales. Es admisible observar que en los países desarrollados tienen un mayor presupuesto para invertir en el área de transporte, existen mejores implementaciones, las cuales surgieron por problemas comunes como problemas viales, inseguridad y afectaciones al medio ambiente.

En México aún no hay grandes avances en el ramo de los Sistemas Inteligentes de Transporte a nivel urbano, hay en operación implementaciones básicas, particulares y no integradas, por

ejemplo, las tarjetas inteligentes de prepago para el cobro automatizado en los diferentes modos de transporte, no usan tarjeta electrónica única para los diferentes modos de transporte existentes en una ciudad.

Gran parte de los avances que se tienen en México son estudios de zona y viabilidades para proyectos que se han realizado para poder implementar los SIT, en algunos estados como son los puertos fronterizos con Estados Unidos.

El Centro de Control de Tráfico con el que cuenta el Distrito Federal es un gran proyecto, pero no se encontró que utilizarán los recursos del sistema de manera adecuada y por falta de mantenimiento, recursos económicos o capacitación ha quedado reducida su función.

Con el surgimiento de los dispositivos móviles se han encontrado aplicaciones independientes de información al usuario donde puede consultarse por ejemplo con los teléfonos inteligentes o se puede hacer uso de las redes sociales como es Twitter; son aplicaciones como “Tráfico México” y “Traffic Escape”.

Algunas aplicaciones que prestan servicios que pueden catalogarse dentro un sistema SAIV para el obtención de rutas son “Google Maps”, “Nokia Maps” o “Bing Maps”, debido a que pueden consultarse en internet y en dispositivos móviles que combinan el uso de GPS, con estas herramientas de software realizar obtención de rutas, ofrecen información de tráfico y pueden servir como sistema de guía, y localización de puntos importantes.

La Ciudad de México actualmente cuenta con una gran carga vehicular en horas pico por lo que se presentan problemáticas de congestionamiento en donde se encuentran involucrados los diferentes modos de transporte público como son los colectivos, taxis, Metro bus, y Metro, así como el transporte privado. Se debe buscar una solución, ofreciendo una mejor gestión del tráfico sin la necesidad de construir más infraestructura y un medio para lograrlo son los Sistemas Inteligentes de Transporte.

3. REDES, HIPER-REDES E HIPER-RUTAS

Este capítulo proporciona los fundamentos teóricos de las redes, y teoría de grafos. Posteriormente se presenta una introducción a la teoría de ruta más corta y los estudios enfocados en el problema de la ruta más corta, para posteriormente abordar los conceptos de hiper-red, hiper-ruta e hiper-ruta viable, que fundamentan al algoritmo del punto 3.3.2, el algoritmo mencionado se utilizó para calcular hiper-rutas más cortas viables en la red multimodal en la zona de estudio de la presente tesis del que el diseño y descripción de esta red multimodal se aborda en el capítulo 5.

3.1 Redes

La teoría de grafos permite modelar de una forma simple cualquier sistema discreto, conocer la conectividad de los elementos que integran el grafo y también son fundamentales para la comprensión de las estructuras de datos y el análisis de algoritmos. Los grafos son una herramienta que permiten representar la red de transporte, mediante grafos dirigidos (punto 3.1.1) de modo que se puedan resolver problemas asociados a estas circunstancias.

Un grafo es un conjunto de nodos unidos mediante conexiones que se llaman arcos. Un arco puede conectar dos nodos, o bien un nodo consigo mismo y pueden representar un proceso o relación funcional de cualquier tipo, pero centra su atención en las relaciones topológicas entre sus elementos.

La modelación de redes de transporte cuenta con una diversidad de aplicaciones, las cuales se encargan de dar solución a los más variados problemas de transporte como son:

- Diseño de redes
- Problema de Flujo a Costo Mínimo
- Problema de Flujo a Costo Máximo
- Problemas de asignación
- Problema de circulación
- Problema de agente viajero (TSP)
- Diseño de rutas de vehículos
- Problema de ubicación de instalaciones
- Problema de asignación de tráfico
- Etc.

La modelación de redes se fundamenta en la teoría de grafos, los conceptos asociados y sus formas de representación se abordan en los puntos siguientes.

3.1.1 Grafos Dirigidos

A continuación se presentan conceptos que definen a los grafos y su notación ya que es importante para la modelación de redes para implementar algoritmos de obtención de ruta más corta. Estos conceptos han sido tomados desde la perspectiva de Ahuja et al. (1993), para mayor detalle consultar el libro Network Flows.

Un grafo (G) se define como un par (N, A), donde N es un conjunto cuyos elementos son denominados nodos y A es un subconjunto de pares no ordenados de vértices y que reciben el nombre de arcos.

*Un **grafo dirigido** $G = (N, A)$ consiste en un conjunto N de Nodos y un conjunto A de arcos cuyos elementos son pares ordenados de nodos.*

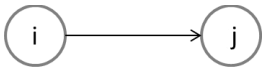


Figura 3-1 Grafo dirigido

*En una **red dirigida** los nodos y los arcos de un grafo dirigido tienen asociados valores numéricos como costos, capacidades, tiempos ofertas y/o demandas.*

*Un **arco dirigido** (i, j) es incidente a los nodos i y j. Se dice que el nodo i en la cola y j es la cabeza. El arco i, j es un arco saliente de i y es un arco entrante de j. Cuando un arco $(i, j) \in A$, entonces el nodo j es adyacente al nodo i.*

*La **lista de adyacencia** $A^+(i)$ de un nodo i es el conjunto de arcos salientes del nodo*

$$A^+(i) = \{(i, j) \in A : j \in N\}$$

La cardinalidad $|A^+(i)|$ es el grado externo de i. La suma de todos los grados externos es igual a m.

$$\sum_{i \in N} |A^+(i)| = m$$

*Los **arcos múltiples**, son dos o más arcos con el mismo nodo cola y el mismo nodo cabeza.*

*Un **Loop** es un arco cuyo nodo cola es el mismo que el nodo cabeza.*

***Sub-grafo**: Un sub grafo $G' = (N', A')$ es un sub grafo de $G = (N, A)$ si $N' \subseteq N$ y $A' \subseteq A$. Se dice que G' es un sub grafo inducido de G por N', si A' contiene todos los arcos de A con*

ambos puntos finales en N'. Un grafo G' es un sub grafo expandido de G por N' = N y $A' \subseteq A$ tal que cualquier par de nodos permanezca conectado.

*Un **paseo** en un grafo dirigido $G = (N, A)$ es un sub grafo de G que consiste en una secuencia de nodos y arcos $i_1 - a_1 - i_2 - a_2 - \cdots i_{r-1} - a_{r-1} - i_r$ que satisfacen la propiedad*

$$a_K = \begin{cases} (i_k, i_{k+1}) \in A \\ (i_{k+1}, i_k) \in A \end{cases} \in \forall \leq k \leq r-1$$

*Un **paseo dirigido** es una versión orientada de un paseo en el sentido de que para dos nodos consecutivos i_k e i_{k+1} sobre el paseo $(i_{k+1}, i_k) \in A$*

*Una **ruta dirigida** es un paseo dirigido sin ninguna repetición de nodos. Es posible almacenar una ruta definiendo un índice predecesor $pred(j), \forall j$ en la ruta.*

*Un **ciclo dirigido** es una ruta $i_1 - a_1 - i_2 - a_2 - \cdots i_{r-1} - a_{r-1} - i_r$ junto con un arco (i_r, i_1) (*Figura 3-2*).*

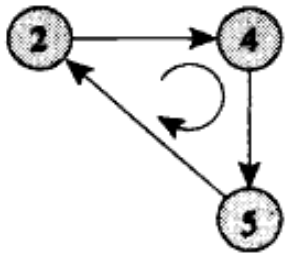


Figura 3-2 Ciclo en un grafo (Ahuja, et al., 1993)

*Un **grafo es conectado** si cada par de nodos están conectados; en el otro caso es desconectado Figura 3-3.*

*Un **grafo es fuertemente conectado** si contienen al menos una ruta dirigida de cada uno de los nodos a los demás, por ejemplo el grafo de la Figura 3-3 no es fuertemente conectado ya que el nodo seis no cuenta con una ruta a ningún otro nodo.*

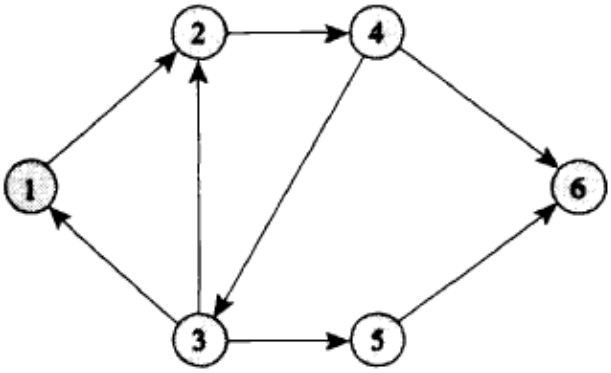


Figura 3-3 Grafo conectado (Ahuja, et al., 1993)

*Un **árbol** es un grafo conectado sin ciclos, sus propiedades son:*

a) Un árbol de n nodos contiene exactamente n-1 arcos.
b) Un árbol tiene al menos dos nodos colgantes (con grado 1).
c) Cada par de nodos del árbol están conectados por una única ruta.

*Un **árbol G** es un árbol expandido de G si T es un sub grafo expandido de G*

- *Un árbol expandido de* $G = (N, A)$ *tiene* $n - 1$ *arcos*
- *Los arcos de G no pertenecen al árbol son* $n - n + 1$

*La adición al árbol expandido de T de algún arco no perteneciente a T crea el ciclo fundamental de G con respecto al árbol T (*Figura 3-4*).*

Un grafo $G = (N, A)$ *es bipartido si es posible particionar sus nodos en dos subconjuntos* N_1 *y* N_2 *de tal forma que para cada arco* $(i, j) \in A$*, ya sea:* $i \in N_1$ *y* $j \in N_2$ *o* $i \in N_2$ *y* $j \in N_1$*. Un grafo G es bipartido si y solo si cada ciclo en G contiene un numero par de arcos (*Figura 3-5*).*

Un grafo es simétrico si para cada arco (i, j) *existe el arco* (j, i) *y no tiene loops.*

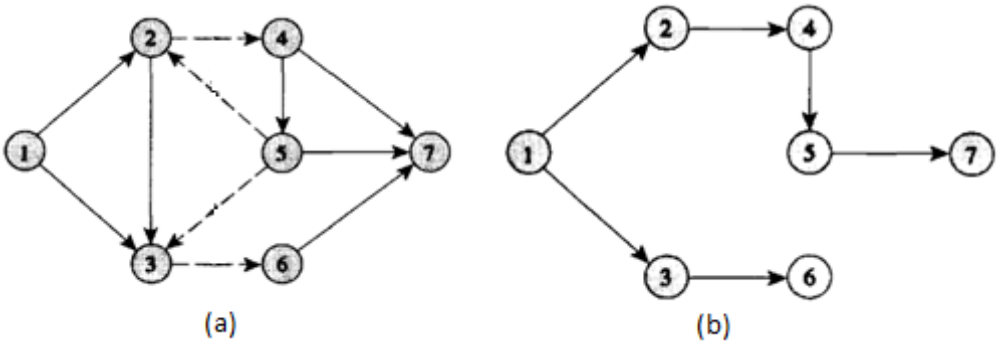


Figura 3-4 El grafo (b) es un árbol expandido de (a) (Ahuja, et al., 1993)

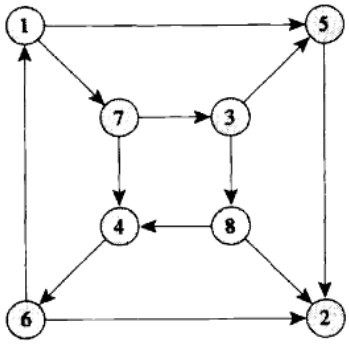


Figura 3-5 Grafo Bipartido (Ahuja, et al., 1993)

3.1.2 Hiper-grafos

Para la modelación de las redes de transporte público es necesario recurrir a los hiper-grafos, ya que permiten representar distintas componentes de información sobre un problema, con lo que se puede reproducir el fenómeno de la espera en una parada de autobús, al que se asocia una distribución de probabilidad que en el caso de los sistemas de transporte público se entiende como la frecuencia de paso de alguna línea o ruta de un modo de transporte.

A continuación se presentan los conceptos de hyper-grafos, para mayor detalle se puede consultar la publicación "Directed Hypergraphs And Applications" de Gallo et al (1992).

> *Un hiper-grafo dirigido o h-grafo es un pareja H = (V,E), en donde V=(v_1,v_2,….,v_n) es un conjunto de nodos y E=(e_1, e_2,…., e_m) es un conjunto de hiper-arcos. Un h-arco e $\in$ E es la pareja e = (t(e), h(e)) en donde t(e) $\subset$ V denota el conjunto de los nodos cola y h(e) $\subset$ V, denota el conjunto de los nodos cabeza. Es decir, el h-arco conecta subconjuntos de V.*
>
> *La cardinalidad de un h-arco es el número de nodos contenidos en él y se denota por $|e|$. El tamaño de H es la suma de las cardinalidades de los h-arcos, es decir:*
>
> $$tamaño(H) = \sum_{e \in E} |e|$$
>
> *La estrella saliente de u$\in$ V(H) es el conjunto de arcos que salen de u y se define por FS(u)={f(u, y) $\in$ E tal que y$\in$V}. Por otro lado, la estrella entrante u$\in$V(H) es el conjunto de arcos que entran a u y se define por BS(u) = {f(y; u) $\in$ E tal que y $\in$ V}, donde BS es la estrella entrante.*
>
> *En la* Figura 3-6 *se presenta una representación de un hiper-grafo.*

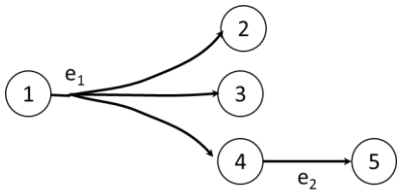


Figura 3-6 Representación de un H-Grafo

Sea H un h-grafo. Una ruta, r_{od}, que conecta un origen 'o' y un destino 'd' es una secuencia de nodos y h-arcos, $r_{od} = (o = t(e_1); e_1, t(e_2), e_2, \dots, e_m; d)$, en donde $t(e_{2i} + 1) \in h(e_i)$ rod = (o = t(e_1); e_1, t(e_2), e_2,…, e_m; d), en donde t(e_i+1) ∈ h(e_i) para i = 1, 2,…, m - 1 y d ∈ h(e_m).

Una hiper-ruta r_{od} es el conjunto mínimo sin ciclos de rutas r_{od}, tal que el destino, d, está conectado a cualquier nodo que pertenezca a r_{od}.

Un hiper-grafo H es un h-árbol, si H es conexo y sin ciclos.

3.2 Ruta más Corta

El cálculo de la ruta más corta es de los problemas de optimización de flujo de redes más estudiados desde el final de los años cincuenta, tiene gran aplicación en el campo del transporte donde hay diferentes tipos de ruta más corta por resolver (Pallottino & Scutella, 1997), permite encontrar la ruta entre pares de nodos (origen y destino) en un área determinada, minimizando el costo asociado (tiempo, precio, longitud, capacidad, etc.).

Existen problemas de ruta más corta no clásicos, donde debido a la estructura de la red o a las condiciones particulares del transporte, son necesarios procedimientos de ruta más corta que sean eficientes y que se adapten a cada tipo de problema de transporte. A continuación se presentan problemas abordados por diferentes autores.

Sea G = (N, A) un grafo simple dirigido, donde N es el conjunto de nodos de cardinalidad n y A el conjunto de arcos de cardinalidad m. Se define la función c: A→R que asigna un costo c_{ij} a cada arco (i, j) ∈ A. **El árbol de ruta más corta** (Shortes Path Tree Problem, STP) consiste en encontrar el árbol generador (T) del dígrafo, que tiene un nodo raíz r tal que minimice el costo de la ruta de r a i en G, para todo i ∈ N (Pallottino & Scutella, 1997). Si se desea encontrar una solución finita al problema, es necesario que en el dígrafo no existan ciclos dirigidos con costos negativos en G, utilizando programación lineal, el problema puede formularse como sigue.

$$min \sum_{(i,j)\in A} C_{ij}x_{ij}$$

$$\sum_{(j,j)\in BS(i)} x_{ji} - \sum_{(i,j)\in FS(i)} x_{ij} = \begin{cases} -n+1 \; si \; i = r \\ 1 \; si \; i \in N \,|\{r\} \end{cases}$$

$$x_{ij} \geq 0, \qquad \forall \, i,j \in A$$

Donde

FS(i): Estrella saliente de i

BS(i): Estrella entrante de i.

Para resolver el SPT han sido propuestos diferentes algoritmos, que mantienen un árbol expandido de T de raíz r donde se verifica etiquetas de costo C, que puede ser el costo de la ruta saliente de r a lo largo del árbol o el costo superior $C_j \leq C_i + C_{ij}$ (condición de Bellman).

En conjunto de nodos candidatos 'Q' es utilizado para guardar los nodos cola y cuando un nodo candidato es tomado de Q, se verifica su estrella saliente de i, si algún costo en la cabeza es mayor que $C_i + C_{ij}$ el costo de C_j es actualizado y j es insertado en Q, este procedimiento es repetido hasta leer el árbol para encontrar la ruta más corta. Esta idea es implementada en diferentes algoritmos propuestos en la literatura, pero varían dependiendo de las reglas de los nodos candidatos en Q (Pallottino & Scutella, 1997).

Otro de los problemas analizados en campo del transporte es el ***Problema de la Ruta más Corta Dinámicos***, que incluyen a el tiempo dentro del análisis de obtención de ruta.

De acuerdo con Pallottino & Scutella (1997), para el *Problema de la Ruta más Corta Dinámicos,* se define un grafo G=(N,A) y el tiempo de viaje o retraso $d_{ij}(t)$ es asociado a cada arco de la red, si t es el tiempo de salida del nodo i, entonces $t+d_{ij}(t)$ es el tiempo de llegada al nodo j, considera también un costo $c_{ij}(t)$ asociado a cada arco (i,j) que representa el costo de viajar por el arco desde el tiempo t y además implementa un costo de espera de i en un tiempo t.

Un modelo discreto T={t1,t2,…tq} de la ruta más corta dinámica es estudiado con una red espacio-tiempo R=(V,E), donde $V=\{i_h : i \in N, 1 \leq h \leq q\}$ y $E=\{(i_h, j_k) : (i,j) \in A, t_h + d_{ij}(t_h) = t_k, 1 \leq k \leq q\}$. Este análisis permitio el desarrollo del algoritmo Crono-STP, el cual selecciona nodos de R en un orden cronológico correspondientes a t1, t2 y así sucesivamente. Este algoritmo usa una estructura de datos en lista de buckets $B=\{B_1,B_2,\ldots,B_q\}$ (Pallottino & Scutella, 1997).

Otro problema de la ruta más corta en el transporte es cuando las rutas más cortas son caracterizadas por dos o más atributos (tiempo, longitud, costo, etc.), que da origen al estudio del ***Ruta más Corta Multicriterio***, estos atributos en algunos casos pueden ser agrupados como un costo generalizado, debido a la complejidad de análisis multicriterio, algunas aplicaciones son imposibles o no recomendadas.

En el **problema bicriterio** de la ruta más corta, es el modelo simple de la *Ruta más Corta Multicriterio,* donde son considerados el costo y el peso de cada arco en un grafo para encontrar un subconjunto π de rutas no dominadas (rutas eficientes) ya que la ruta optima puede no existir. Hensen (1980), ha estudiado el problema, logrando resolver en un tiempo polinomial, dependiendo de las funciones de los criterios de costo y peso.

Otro enfoque del problema multi criterio es abordado por Pallottino and Scutella (1997) con el algoritmo topológico polinomial, que adapta el **Chrono-SPT** y encuentra rutas no dominadas en

orden no decreciente del peso de la ruta. Este algoritmo puede encontrar las rutas de costo mínimo restringiendo el número de transferencias modales k para que no excedan un límite máximo, no considera restricciones multimodales, teniendo como resultado una complejidad de O(mk).

En la práctica, el número de transferencias modales es determinado por el usuario, en el caso del transporte urbano, el número de transferencias máximas deseadas por un usuario no excede el valor de k=5.

El estudio de la ruta más corta aún tiene problemas por resolver, como se ha descrito, cada caso de aplicación en el transporte atiende a problemas particulares en los cuales pueden ser adaptados modelos que ya han sido estudiados y se requiere nuevos enfoques para dar soluciones en el ámbito del transporte. El algoritmo que se implementó en el desarrolló en esta tesis está basado en el Chrono-STP y conceptos que se describen en este punto.

3.3 Hiper-Ruta Más Corta

En el caso del transporte público, la ruta no puede ser obtenida con los modelos clásicos, como los descritos en el punto 3.2. Nguyen & Pallottino (1988), mencionan que el comportamiento que los usuarios tienen al tomar el transporte público, es que un usuario debe decidir en una parada empezar o continuar su viaje para ir a su destino y tienen la posibilidad de escoger “a priori” entre un conjunto de líneas o rutas, la cual es llamada “conjunto atractivo”. El uso de hiper-grafos, que se trató en el punto 3.1.2, sirve en la modelación de transporte público.

Cuando un usuario arriba a la estación i, existe la posibilidad de que más de una línea de transporte lo lleve a su destino. El conjunto de líneas de trasporte que pasan por i y que llegan al destino seleccionado por el usuario recibe el nombre de **conjunto atractivo** (Lozano & Storchi, 2002).

Pallottino & Scutella (1997) describen que una hiper-ruta está formada por conjuntos de rutas que van de un origen a un destino, donde cada ruta utiliza solo líneas atractivas como alternativa al viaje para los pasajeros. Los conjuntos de rutas son determinados en las paradas, donde es calculado el conjunto atractivo con una cierta probabilidad y así sucesivamente en las siguientes paradas.

El costo esperado de la hiper-ruta es el costo medio de las rutas pertenecientes a la hiper-ruta, donde el peso es la probabilidad de que la ruta suceda. Los arcos de la red, así como los arcos de transferencia modal tienen asociados un tiempo de recorrido y los hiper-arcos (h-arcos) tienen asociado una frecuencia de paso del transporte público que será abordado.

A continuacion se presentan conceptos tomados de la publicacion *Shortest Viable Path Algorithm in Multimodal Networks* (Lozano & Storchi, 2002) que definen a las hiper-rutas en redes multimodales.

Definición: Un H-grafo es un par H =(N,E) donde N es el set de nodos, E es el set de H-arcos.

El grafo obtenido a partir de todas las rutas alternativas es un conjunto de rutas del origen al destino del viaje el cual es denominado como "hiper – ruta", donde el costo medio de las rutas pertenecientes a la hiper-ruta es el costo esperado.

Una ruta q_{od} *es una secuencia de nodos y h-arcos.*

$$q_{od} = (o = t(e_1), e_1, t(e_2), e_2, \dots, e_m, d)$$

$$donde\ t(e_{i+1}) \in h(e_i), para\ i = 2, \dots, m-1, y\ d \in h(e_m)$$

Una hiper-ruta p_{od} *es el mínimo conjunto acíclico de rutas* q_{od} *tal que el destino* d *este desconectado con cada nodo perteneciente a* p_{od}.

La ruta cuyos nodos representan las paradas de la línea es representada por $l, y\ l \in L.\ L$, *es el conjunto de líneas con paradas en i o de los nodos correspondientes a las paradas de línea en i.*

Los supuestos que se consideran para los hiper-arcos son:

- Los pasajeros llegan aleatoriamente a cada parada y siempre abordan el primer vehículo de su conjunto atractivo que llega.
- Las líneas son estadísticamente independientes y cada línea llega a un nodo con una distribución exponencial.

$\Phi(L_i') = \sum_{l_j \in L_i'} \phi_j$ Frecuencia combinada del conjunto atractivo

$w(L_i') = \frac{1}{\Phi(L_i')}$ Tiempo promedio de espera en la parada i

$\pi_j(L_i') = \frac{\phi_j}{\Phi(L_i')}$ Probabilidad de que el primer vehículo que llegue i sea de la línea j

Por lo tanto, el tiempo esperado de viaje V_p (i) de ir del nodo i al destino d, asociado con cada hiper-ruta P_{id}, está dado por:

$$V_p(i) = \begin{cases} c(i,j) + V_p(j) & \text{si } e = (i,j) \\ w(e_i') + \sum_{j \in h(e_j')} \pi(e_i', j) V_p(j) & \text{si } e' \text{ es un } h\text{-arco de abordaje.} \end{cases}$$

Para mayor detalle acerca de la formulación de las hiper-rutas, consultar Gallo, et al. (1992) y Pallottino & Scutella (1997).

3.3.1 Hiper-ruta multimodal

Una **red multimodal** está formada por redes modales las cuales están unidas mediante un arco de transferencia modal, que representa la acción de abandonar el modo transporte actual y pasar a un nuevo modo de trasporte (Lozano & Storchi, 2002). En la red multimodal el h-grafo se define como una tripleta H =(N,M,E) donde N es el set de nodos, E es el set de h-arcos y M es el set de nodos asociados a los arcos.

Lozano & Storchi (2002), mencionan que la transferencia modal puede representar las siguientes acciones.

1) *Dejar una línea del modo actual*
2) *Dejar el modo actual*
3) *Acercarse al nuevo modo-r*
4) *Espera del modo r*
5) *Tomar el modo r*

Un h-grafo multimodal se compone de tres tipos de h-arcos: h-arco de abordaje, arcos de viaje y arcos de transferencia modal. Un transbordo es el cambio de línea en un mismo modo M_i

- Los h-arcos de abordaje representan la acción de esperar o tomar algún modo M_i.
- Los arcos de viaje, implican la acción de viajar por algún modo M_i o dejar el modo actual.
- Los arcos de transferencia modal permiten cambiar entre los modos M_i.

De acuerdo con Lozano y Storchi (2002) solo se consideran 9 modos en las redes urbanas y son clasificadas en 6 subconjuntos de acuerdo con sus características (Tabla 3-1), cada modo del subconjunto 2 puede ser representado por un h-grafo. Los modos son clasificados de acuerdo a sus características, los elementos del h-arco es un elemento del conjunto $\mathrm{M} = \{\mathrm{M}_1, \mathrm{M}_2, \mathrm{M}_3, \mathrm{M}_4, \mathrm{M}_5, \mathrm{M}_6\}$.

Tabla 3-1 Clasificación de modos (Lozano & Storchi, 2002).

Subconjunto	Descripción
M_1	Transporte público de rieles: Metro y tren
M_2	Modos de plataforma publica: autobús, taxi colectivo y taxi
M_3	Modos privados con necesidades de estacionamiento: automóvil y moto
M_4	Modos privados sin necesidades de estacionamiento: bicicleta
M_5	Modo peatonal
M_6	Transferencia modal

3.3.2 Hiper-ruta multimodal viable

Lozano & Storchi (2001), han estudiado el problema de la ruta mas corta viable e **hiper-rutas en redes multimodales viables**, el cual esta basado en el modelo Chrono-STP de Pallottino presentado en el punto 3.2, integrando restricciones de modo para obtener una ruta viable.

Para obtener "la mejor" ruta en una red multimodal se deben de considerar aspectos particulares y condiciones del lugar de donde se está modelando la red, por ejemplo no es posible hacer un transbordo de Metro a auto en cualquier estacionamiento debido a que puede o no estar disponible un automóvil en ese lugar o un estacionamiento cercano a la estación del Metro.

A continuación se presentan las definiciones sobre viabilidad estudiadas por Lozano & Storchi (2002).

Definiciones:

- *Una hiper-ruta multimodal es viable si las rutas que componen a la hiper-ruta no incluyen más de una maximal mode-r-subpath para cada $r \in M_v$. La ruta de la hiper ruta viable multimodal no usa un modo restringido más de una vez.*
- *Hiper - ruta monomodal modo-r es un hiper-ruta compuesto de nodos que pertenecen al mismo set de nodos N_r, $r \in M_2$*
- *Una hiper-ruta multimodal es una hiper ruta compuesta de nodos que pertenecen a diferentes sets de nodos N_r, $r \in M$*
- *Un modo-r es un modo limitado si solo una máxima subruta-modo-r es permitida en una ruta*

Para poder verificar que una hiper-ruta es viable es necesario crear un diagrama de "estados-s" en el cual se estructura la configuración de los modos en la hiper-ruta viable. Se asignan estados que llevan una secuencia específica de modos usados en una ruta (Figura 3-7). Un "estado-s" indica la secuencia especifica de modos usados en toda la ruta.

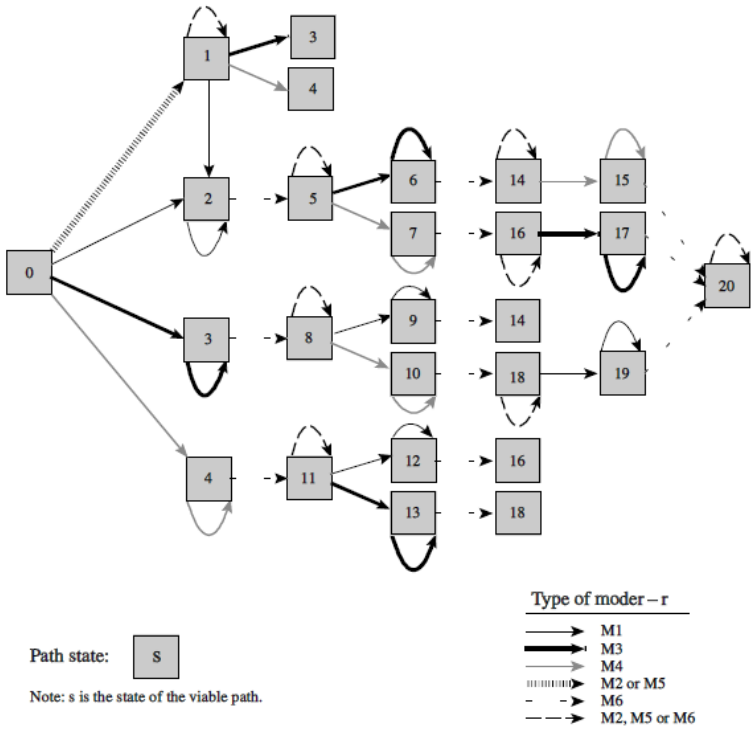


Figura 3-7 Diagrama de estados para una ruta viable multimodal (Lozano & Storchi, 2002)

Las rutas con el mismo estado asociado (secuencia de los modos usados) admiten ser concatenadas con la misma ruta. La parte de viabilidad es un proceso de suma importancia para la concatenación de los arcos, el cual genera la nueva *hiper-ruta viable*. La concatenación se puede generar de 2 maneras diferentes (Lozano & Storchi, 2002).

1. Sea $e = (i, j)$ un arco modo-r y p_{ij} una hiper-ruta viable de j a d. La concatenación de p_{ij} con el arco e es una hiper-ruta viable si la concatenación del arco e con cada ruta viable q_{ij} que componen a la hiper-ruta, generan una ruta viable.
2. Sea $e' = (i, h(e'))$ un hiper-arco de abordaje y $p_{ij}\ \forall j \in h(e'_i)$ la hiper-ruta viable de los nodos j a d. La concatenación de una hiper-ruta viable p_{jd} con el h-arc e'_i siempre será una hiper-ruta viable.

Los cambios de modo se definen como transiciones. La transición de estado s_1 a un estado-s a través de un arco de modo-r ($\in$M), es la acción de obtener una ruta de estado-s por medio de la concatenación de una ruta de estado s_1 con un arco de modo-r.

En el caso de que un modo de transporte se analice como hiper-rede viable, se deben evaluar las hiper-transiciones del cual la hiper-transición de estado de s_x y s_y a un estado s ($s_x * s_x = s$) es la especificación de un estado s e indica la secuencia de modos de hiper-rutas de estado s_x y s_y

.

Algoritmo "Shortest Viable Hyperpath in Multimodal Networks"

Lozano y Storchi (2002) presentan un algoritmo el cual consiste en encontrar la ruta viable mínima respecto al costo generalizado para un número de transferencias modales 'k' que son decididas por el usuario en redes multimodales.

Este algoritmo está basado en el modelo Chrono-STP de Pallottino y Scutella (1997) que resuelve problemas de Ruta más Corta. Primero encuentra, si es posible, la ruta más corta sin transferencias modales, después busca la ruta viable que mejore en tiempo a la anterior con una transferencia modal. El procedimiento se repite hasta encontrar el máximo número de transferencias modales permitido, es decir, k. Al final el algoritmo arroja un conjunto Pareto optimal de rutas viables, en donde el usuario decide la ruta que mejor se adapte a sus preferencias (López, 2010).

El conjunto Pareto Optimal es un subconjunto factible, en otras palabras, es cuando no pueden lograrse nuevas mejoras sin afectar otros aspectos del problema. En el caso de cálculo de hiper-rutas, se tiene una solución no dominada por otra donde ya no se puede mejorar, por ejemplo no se puede mejorar el tiempo sin reducir el número de transferencias modales u otra variable utilizada en el cálculo de la hiper-ruta.

Las hiper-rutas tienen valores asociados con dos criterios que son el tiempo de viaje esperado y un límite superior de transferencias modales, lo cual forma un conjunto Pareto Optimal.

Las variables que maneja el algoritmo de Lozano y Storchi (2002), son las siguientes:

$V_s^*(i) =$ *Tiempo de viaje esperado de la hiper ruta más corta actual* $[i, s]$.
$w_s(i) =$ *Límite superior de transferencias modales en la hiper ruta más corta actual* $[i, s]$.
$SA_s(i) =$ *H-arc sucesivos del nodo* i, *en la hiper ruta más corta actual* $[i, s]$.
$ST_s(i) =$ *Conjunto de estados, de hiper-rutas mínimas actuales en la cabeza del h-arc* $SA_s(i)$.
$lastlabel_s(i) =$ *Tiempo de viaje esperado de la última hiper-ruta más corta* $[i, s]$ *con limite superior de transferencias modales menor que* $w_s(i)$.

La etiqueta $lastlabel_s(i)$, es usada para eliminar hiper-rutas dominadas y $ST_s(i)$ y $SA_s(i)$ son utilizadas para reconstruir hiper-rutas $[i, s]$.

Para cada h-arco e con $|h(e)| > 1$ (h-arco que representa más de 1 línea de transporte público), la siguiente información se conserva:

$h(e) =$ *Conjunto de nodos que componen la cabeza de* e.
$\Phi(e) =$ *Frecuencia de las líneas que pueden ser tomadas a través de* e
$C^*(i) =$ *Tiempo de viaje mínimo esperado de* i *a* d, *obtenido usando* e.

La pareja $[i, s]$ es etiquetada cuando el tiempo de viaje esperado de la hiper-ruta p_{id} del estado-s es mejorado usando el arco (i, j).

Los conjuntos $Qnow$ y $Qnext$ analizan las parejas etiquetadas nodo estado en orden no decreciente con respecto al máximo número de transferencias modales de hiper-rutas. Si el arco (i, j) es una transferencia modal, entonces $[i, s]$ es insertado en $Qnext$.

Para cada iteración $Qnow$ va tomando valores de $Qnext$ hasta que $Qnext$ queda vacío, este procedimiento se repite solo si $k' > k$ ó $Qnow$ queda vacío. Para controlar la dominancia entre el tiempo de viaje esperado y el límite máximo de transferencias modales se utiliza $lastlabel_{s_x}(j)$; si

$V_s^*(i) > lastlabel_{s_x}(j)$, entonces se actualiza la etiqueta $lastlabel_{s_x}(j) = V_s^*(i)$ de lo contrario, la hiper-ruta p_{id} del estado-s ya no se considera.

```
Procedure Shortests Viable Hyperpath Problem
{
for each j in N do V_s*(i) = ∞∀s
for each e in E do
    {C*(e) = ∞; h*(e) = ∅; Φ*(e) = 0}
Qnow = {[d, 0]}; V_0*(d) = 0
repeat {
   while Qnow ≠ ∅{
      select [j, s_x] from Qnow
      Qnow = Qnow/{[j,s]}
      if (V_sx*(j) < lastlabel_sx(j)){
         lastlabel_sx(j) = V_sx*(j)
         for each e ∈ B(j) do {
           i = t(e)
           if(|h(e)| = 1)
               call Procedure Arc − Concatenation (e, s_x, V*, c, w)
           else
               call Procedure h − Arc − Concatenation (e, s_x, V*, c, w, h*, φ)
           }
       }
    }
  Qnow = Qnext;
  Qnext = ∅;
  h = h + 1
  until h > k or Qnow = ∅}
```

Figura 3-8 Procedimiento Shortest Viable Hyperpath Problem (Lozano & Storchi, 2002)

El procedimiento Shortests Viable Hyperpath Problem (Figura 3-8) asigna valores iniciales, establece el valor de *lastlabel* y el número de transferencias máximas para el ciclo y lee la estrella entrante de cada nodo de la red. Controla el número de ciclos (transferencias) que se ejecutan en el procedimiento.

El proceso de Arc-concatenation (Figura 3-9) es utilizado para concatenar los arcos analizados, se agregan arcos a la ruta; el arco $e = (i, j)$ con la hiper-ruta de estado s_x y determina si existen nuevos estado-s en una hiper ruta viable y su límite máximo de transferencias modales.

Compara el tiempo de viaje esperado de una hiper-ruta de estado-s con el tiempo en el instante actual y el tiempo esperado s_y el cual será preferido sobre el estado s. Si el tiempo de la nueva hiper-ruta es menor que ambas concatenan el arco leído, en caso contrario no genera la hiper-ruta.

```
Procedure Arc − Concatenation (e,s_x,V*,c,w)
{
   wt = 0;s = 0;con = 0
   switch (mode_e)
   case (∈ M1:)
      if (s_x ≠ 5,14,16 and20)call State − M1 (s_x,s)
   break
case (∈ M3)
   if (s_x ≠ 8,14,18 and 20)call State − M3(s_x,s)
break
case (∈ M4)

   if (s_x ≠ 11,16,18 and 20)call State − M4(s_x,s)
case (∈ M6)
   if (w_{s_x}(j) < k and s_x ≠ 0) wt = 1; call State − M6(s_x,s)
break
default
   if (s_x = 0)s = 1
   else s = s_x
break
endswitch
if (s ≠ 0 and V*_{s_x}(j) + c(e) < V*_s(i)) call States(s,SM)
else SM = ∅
while (EOF(SM) = 0 and con ≠ 1) {
select s_y from SM
if (V*_s(j) + c(e) < V*_{s_y}(i)) {
   V*_s(i) = V*_{s_x}(j) + c(e)
   w_s(i) = w_{s_x}(j) + wt
   SA_s(i) = e
   ST_s(i) = s_x
   if (wt = 0 and[i,s] ∉ Qnow)Qnow = Qnow ∪ {[i,s]}
   if (wt = 0 and[i,s] ∉ Qnext)Qnext = Qnext ∪ {[i,s]}
   con = 1
 }
 }
}
```

Figura 3-9 Procedimiento Arc Concatenation (Lozano & Storchi, 2002)

El procedimiento h-Arc-Concatenation (Figura 3-9) es utilizado para concatenar un hiper arco si se cumple que $|h(e)| > 1$ con una hiper ruta $p_{id}, j \in h(e)$. Determina el estado s de una hiper-ruta mediante el procedimiento determine-s, el cual se encarga de asignar un estado-s a una hiper-ruta viable p_{id}.

Actualiza el conjunto de nodos cabeza e, su frecuencia $\Phi^*(e)$, el conjunto viable de hiper-rutas que pasan por él y el tiempo de viaje esperado mínimo.

```
Procedure h − Arc − Concatenation (e, s_x, V*, c, w, h*, φ)
{
  con = 0
  if(Φ*(e) ≠ 0) call Determine − s (s, s_x, s_z(e))
  else s = s_x
  if V*_{s_x}(j) < V*_s(i)) {
  Φ*(e) = Φ*(e) + φ_j
  h*(e) = h*(e) ∪ {j}
  state(e) = state(e) ∪ {s_x}
  s_z(e) = s
  if(Φ*(e) = φ_j)C*(e) = 1/φ_j + V*_{s_x}(j)
  else C*(e) = C*(e) − (C*(e) − V*_{s_x}(j))φ_j/ϕ*(e)
  if (C*(e) < V*_s(i)) call States (s; PS)
  else PS = ∅
  while (EOF(PS) = 0 and con ≠ 1) {
  select s_y from SM
  if (C*(e) < V*_{s_y}(i)) {
  V*_s(i) = C*(e)
  w_s(i) = w_{s_x(j)}
  SA_s(i) = e
  ST_s(i) = State(e)
  if ([i, s] ∉ Qnow)Qnow = Qnow ∪ {[i, s]
  con = 1
  }
 }
 }
}
```

Figura 3-10 Procedimiento h-Arc Concatenation (Lozano & Storchi, 2002)

La última etapa del procedimiento *Determine-s* (Figura 3-10) asigna el estado-s que resulta de las transiciones entre la hiper-ruta actual y la nueva hiper-ruta. Este procedimiento está basado en un grafo de estados-s que depende del número de modos que se deseen modelar.

```
Procedure Determine − s(s, s_x, s_z(e))
{
  sum = s_z(e) + s_x
  if (s_z(e) = 1)s = s_x
  else if (s_x = 1 or (s_z(e) = s)) s = s_z(e)
    else if (sum = 19) {
      if (s_z(e) = 14 or s_x = 14) s = 14
      else s = 18
    }
    else if (sum = 26 or 29) s = 18
      else if (sum = 16, 21 or 27) s = 16
        else if (sum = 13 or 22) s = 14
          else s = 20
}
```

Figura 3-11 Procedimiento Determine –s (Lozano & Storchi, 2002)

4. ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO Y DIGITALIZACIÓN DE LA RED MULTIMODAL

En el presente capítulo se describe la problemática observada en el Centro de Coyoacán, se describe el estado actual y la delimitación del área de estudio, posteriormente se explica el procedimiento para la digitalización de las redes de los modos de transporte existentes en la zona y poder crear la hiper-red multimodal la cual en parte servirá para el Sistema Avanzado de Información al viajero.

Una vez digitalizada la red, se presenta un análisis de la operación transporte urbano en la zona de estudio donde se analizan los modos de transporte existentes y sus conexiones modales para así determinar cuáles son los principales accesos y tener un panorama más amplio del funcionamiento de la red de transporte público en el centro de Coyoacán.

El último punto de este capítulo enfatiza las ventajas de un sistema de transporte sustentable, el cual se busca desarrollar en la zona de estudio para la presente tesis. El transporte sustentable permite mejorar la accesibilidad, promover los modos alternativos de transporte y promover una movilidad mediante un mejor uso de los recursos existentes de acuerdo a la problemática descrita en el primer punto de este capítulo.

4.1 Descripción de la problemática en la Zona de Estudio

Como se mencionó en el capítulo 1, la zona de estudio está delimita por las calles Av. Universidad, Miguel Ángel de Quevedo, Río Churubusco y Avenida Tlalpan en la Delegación Coyoacán (Ver punto 1.4 del capitulado). Se ha seleccionado esta área por incluir parte del sistema Metro, ya que es uno de los modos de acceso principales para llegar al centro de Coyoacán.

Peatones

El centro de Coyoacán por ser una zona turística, genera un gran número de visitantes durante los fines de semana y días festivos. El gran número de peatones que transita la zona centro de Coyoacán encuentra conflicto con los automovilistas y con el transporte público que circulan por las calles aledañas a la plaza Hidalgo, tanto los peatones como los conductores de los vehículos hacen uso de la vialidad en los cruces, este hecho ocasiona congestión en las vialidades y puede ocasionar accidentes con los peatones (Figura 4-1).

Debido a la gran afluencia de visitantes, se puede observar principalmente en las calles Felipe Carrillo Puerto e Ignacio Allende que existe una saturación sobre las aceras lo que ha obligado a

los peatones caminar sobre la superficie de rodamiento (Figura 4-2), teniendo que cuidarse de los automovilistas y viceversa los automovilistas de los peatones, aunado a los vehículos estacionados en espacios públicos como en la calle Ignacio Allende, se ve reflejado en una reducción de los carriles de circulación, de velocidad crea inseguridad al caminar (Figura 4-3).

Figura 4-1 Conflictos entre peatones y automovilistas

Figura 4-2 Saturación de banquetas en calle Ignacio Allende

Figura 4-3 Cruces Peatonales en calle Felipe Carrillo Puerto

Estacionamientos

A pesar de que existen estacionamientos públicos, su cupo es insuficiente para albergar la demanda de vehículos que llegan a la zona, estos automovilistas se ven obligados a estacionarse en la vía pública; otros automovilistas prefieren evitar pagar una tarifa en estacionamientos públicos y buscan estacionarse en la vía pública, llegando a situarse hasta en doble fila, lo que genera una disminución de carriles disponibles para transitar, provocando un congestión vehicular y empobrecimiento de la imagen urbana.

La mayoría de los estacionamientos se encuentran en cercanías a la plaza Hidalgo, por lo que incentiva a los automovilistas a llegar al centro de Coyoacán para estacionarse, generando que haya más vehículos circulando por las calles Felipe Carrillo Puerto, Centenario, tres Cruces, Belisario Domínguez, Caballo Calco, Av. Miguel Hidalgo y Moctezuma. Además no existe información por parte de la delegación acerca de la ubicación de los estacionamientos públicos.

Transporte Público

Los microbuses hacen uso de las vialidades principales del centro de Coyoacán, para atender la demanda de los visitantes, los microbuses hacen paradas continuas, acarrean y recolectan pasaje principalmente enfrente de la plaza Hidalgo sobre la calle Felipe Carrillo Puerto, obstaculizando el flujo vehicular por bloquear un carril de la superficie de rodamiento.

En la zona centro de Coyoacán, no hay información de la red transporte público de pasajeros, como ya se mencionó en el capítulo 1. El transporte público en la Ciudad de México no cuenta con una regulación en cuanto a horarios, lo que genera incertidumbre al viajero a la hora de trasladarse por este medio. Frecuentemente, el viajero no sabe qué rutas pasan por la vialidad, cada cuanto tiempo pasan o que recorrido realizan.

No se encontraron sistemas de información acerca de los servicios de transporte público, y como éstos se conectan entre sí o con los otros modos de transporte.

4.2 Construcción las redes y la hiper-red

Para poder llegar a un sistema de obtención de rutas es necesario contar con la red digitalizada del área que se va a analizar. La cual deberá contar con información asociada de la red en una tabla de atributos o base de datos como por ejemplo longitud, tiempo, nombre, sentido vial para que el modelo funcione adecuadamente.

La red de transporte del centro de Coyoacán se digitalizó para poder realizar un análisis de su funcionamiento, así como de su distribución y conexión entre las diferentes redes de transporte público y privado. Este proceso fue necesario para la implementación de un sistema de

información del cual como se describió en el punto 4.1 anterior, no existe información alguna de este tipo en la Delegación Coyoacán.

En el proceso de digitalización de las líneas de transporte público y los puntos de interés de la red vial de la zona de estudio, se utilizó el software Google Earth y el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGIS principalmente. La zona de estudio se ubicó con Google Earth con ayuda de la imagen satelital, como se muestra en la Figura 4-4.

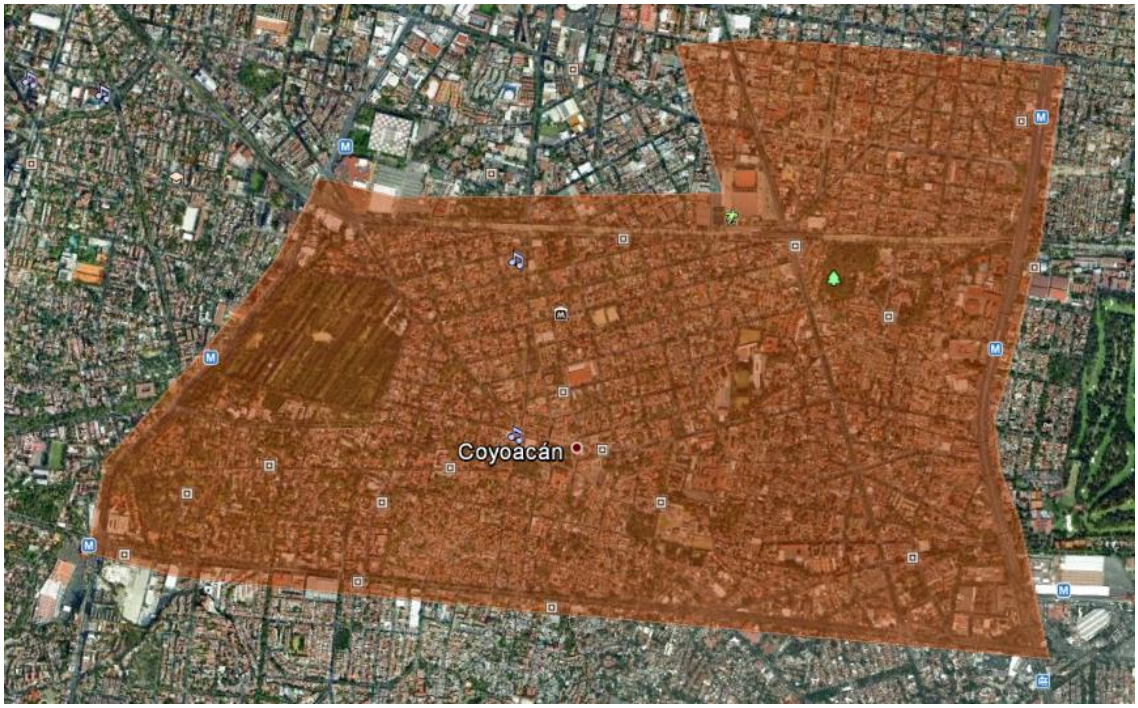


Figura 4-4 Zona de estudio en Coyoacán

Mediante visitas a la zona de estudio, se identificaron los modos de transporte que son utilizados principalmente para acceder al centro de Coyoacán, las rutas de transporte público encontradas fueron RTP, Metro, trolebús, autobuses y microbús.

Se realizó levantamiento de campo con ayuda de la aplicación “My Tracks” para teléfonos con sistema operativo Android, hace uso del GPS del dispositivo para grabar recorridos y permite exportar datos geográficos, con esta aplicación se grabaron recorridos de microbuses y se ubicaron estacionamientos en la zona de estudio.

Los archivos obtenidos de la aplicación My Tracks son de extensión “KML” (Keyhole Markup Language), que es el formato nativo de Google Earth, también se apoyó en esta herramienta de mapas digitales para identificar otros recorridos de microbuses, trolebús, RTP (rutas obtenidas de la página web oficial de RTP: Red de Transporte de Pasajeros del Distrito Federal), estacionamientos y sitios de interés para complementar el levantamiento en campo (ver Figura 4-5).

Para la digitalización de las rutas, se siguió el siguiente proceso: En Google Earth con la imagen satelital y con la herramienta “Agregar ruta”, se trazaron y se importaron las rutas obtenidas de los modos de transporte público que pasa por la zona de estudio. Debido a que se trazaron diferentes líneas de transporte público, fue conveniente organizarlas carpetas, para el buen manejo y fácil conversión de los archivos en los siguientes procesos.

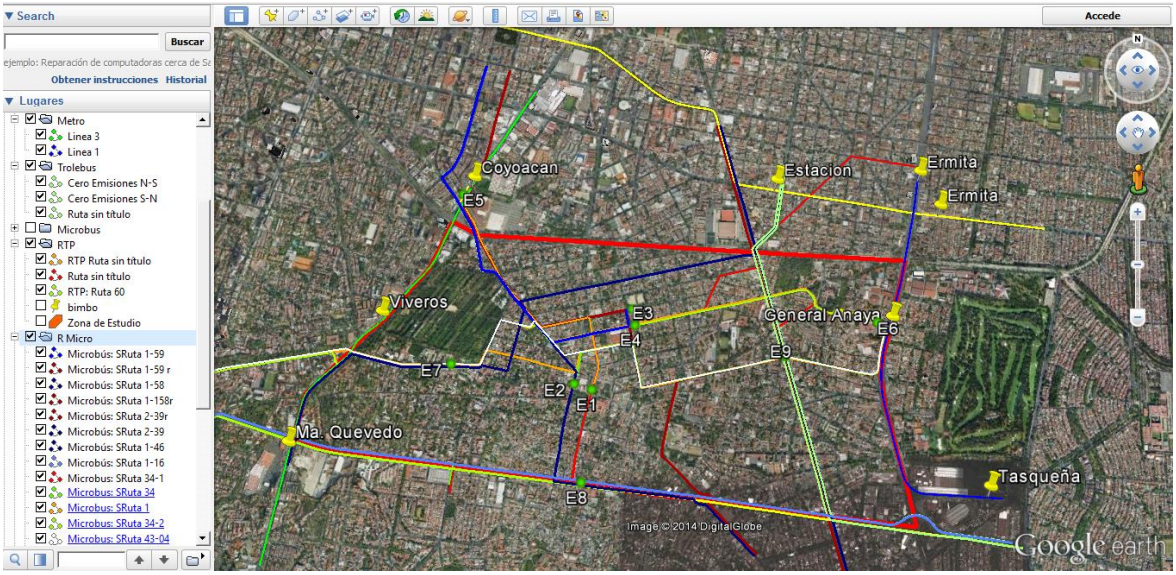


Figura 4-5 Ejemplo de la red de transporte público capturada en Google Earth

Una vez trazada todas las líneas de transporte público, se clasificaron las capas de puntos (estacionamientos y sitios de interés) y líneas (recorridos del transporte público) y se exportaron los archivos KML.

Para poder hacer un análisis de esta información, fue necesario utilizar un Sistema de Información Geográfica (SIG) para corregir y homologar información, por lo que se utilizó el software ArcGIS.

ArcGIS cuenta con la herramienta “KML to Shape” para convertir archivos KML a formato “Shape” (SHP), que es el formato de archivo de datos espaciales de ESRI crea y comercializa software de ArcGIS. Para el proceso de conversión se utilizó la proyección UTM zona 14 Norte para el Distrito Federal y elipsoide de referencia WGS 1984.

Una vez importado el archivo en ArcGIS como archivo shape, se corrigieron errores como arcos sueltos, arcos no conectados, arcos faltantes, topología, etc., y se creó la base de datos asociada a la red

Para la creación de la red vial de la zona de estudio, se utilizó de base la red del INEGI (2010), la cual cuenta con múltiples errores de conexión de arcos, arcos faltantes, y arcos con sentido vial incorrecto, por lo que fue necesario eliminar gran parte de estos arcos y se corrigió la red capturando de nuevo los arcos en ArcGIS con base a un mapa satelital de Google Maps. De la red de INEGI (2010) se rescató principalmente la tabla de atributos asociada a la red.

Después del proceso descrito, se generaron la red vial y la red de transporte público de la zona de estudio. En este punto la red de transporte público estaba compuesta en diferentes capas (Metro, microbús, trolebús y RTP) para poder procesarla y analizarla.

En la Figura 4-6 se muestra la red vial correspondiente a la zona de estudio; se pueden observar las vialidades principales, secundarias y locales.

En la Figura 4-7 se puede apreciar la red de transporte público Metro, ésta queda indicada sobre la red vial para una mejor representación.

En la Figura 4-8 puede apreciarse la red de transporte público concesionado correspondiente a las líneas de microbús, ésta queda indicada sobre la red vial para una mejor representación y en la Figura 4-9 se presenta la red RTP ordinario que tiene base en la estación General Anaya de la línea 2 del Metro y pasa por el centro de Coyoacán.

Figura 4-6 Red vial de la Zona de Estudio

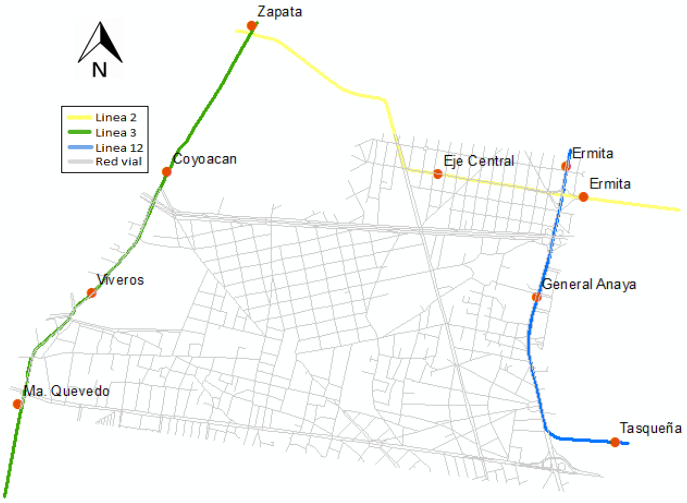


Figura 4-7 Red de transporte Metro cercano a la zona de estudio

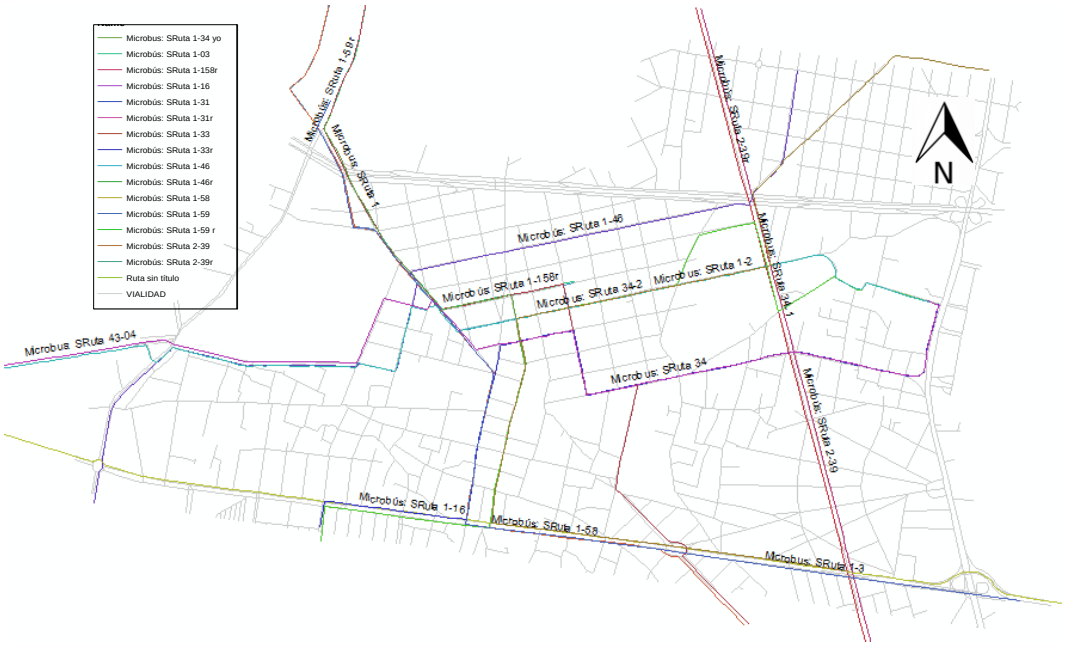


Figura 4-8 Red de transporte público concesionado (microbuses)

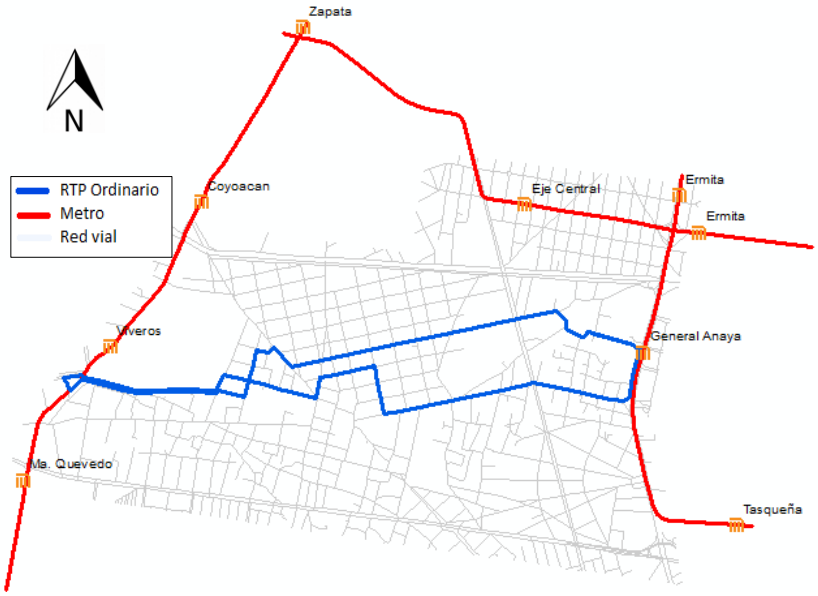


Figura 4-9 Red de Transporte Público (RTP) en el centro de Coyoacán

Los sitios de interés se capturaron en la red como una capa de puntos (Figura 4-11) y son utilizados para determinar las zonas peatonales así como para determinar los puntos de mayor afluencia.

Se encontraron conexiones importantes los microbuses que van y llegan del centro de Coyoacán y las estaciones del Metro “Coyoacán” de la línea 3, “General Anaya” de la línea 2, y la estación “Eje Central” de la línea 12, como se indica en la Figura 4-10.

La ubicación de los estacionamientos se indica en la Figura 4-12. Los estacionamientos fueron ubicados y geo-referenciados mediante trabajo de campo. Estos datos son utilizados para conectar las redes de transporte privado con la red de transporte público para que el usuario tenga conocimiento del lugar donde pueda estacionar su vehículo y realizar una transferencia modal a algún otro modo de transporte el cual pase por la zona.

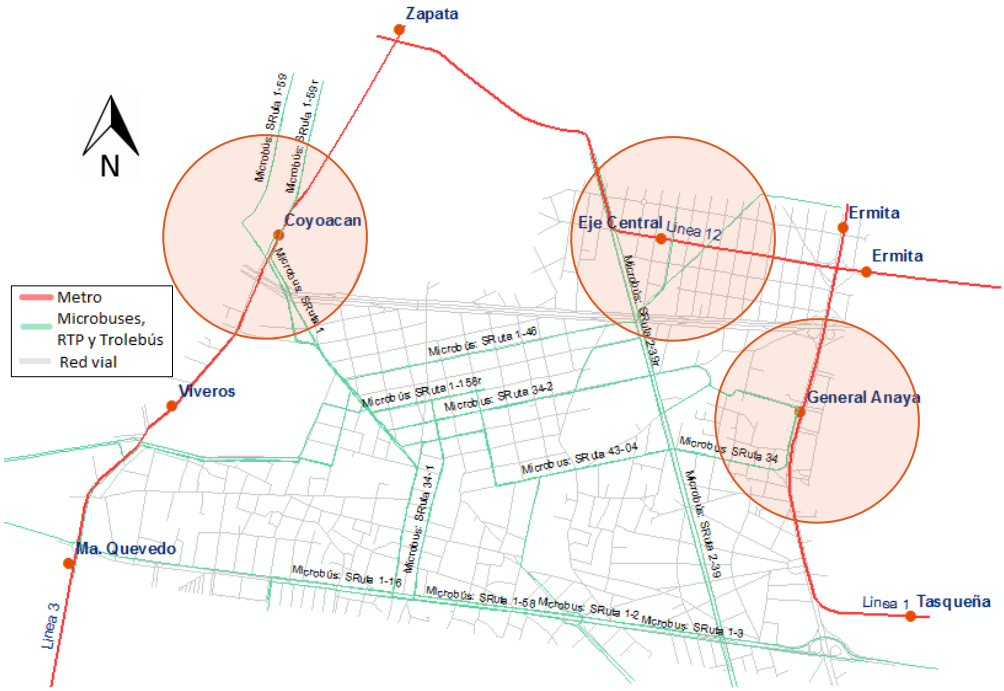


Figura 4-10 Principales conexiones modales del Metro y el transporte público concesionado con acceso al centro de Coyoacán

Figura 4-11 Puntos de interés en el centro de Coyoacán

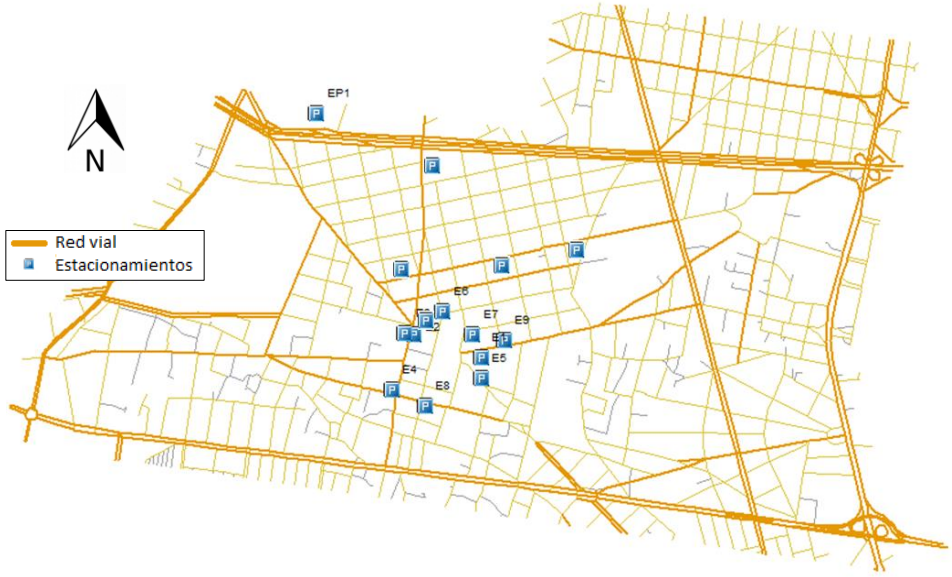


Figura 4-12 Ubicación de estacionamientos en la zona centro de Coyoacán

El servicio de transporte público en la Ciudad de México no cuenta con itinerarios estrictos, ni información sobre el servicio el cual pueda ser consultada por los usuarios. En las paradas de los distintos modos de transporte público de la zona centro de Coyoacán, el usuario no cuenta con información acerca de la hora de llegada de los vehículos de autotransporte, ni su frecuencia de paso.

Para poder aplicar el algoritmo Shortest Viable Hyperpath in Multimodal Netwoks, que se explicó en el capítulo 3, un elemento de suma importancia para que el algoritmo pueda leer de manera correcta la hiper-red son los hiper-arcos, que representan a las paradas del transporte público donde se realice un ascenso y descenso de pasajeros del transporte público en dónde exista un comportamiento probabilístico en el tiempo de paso de un vehículo.

La representación de los hiper-arcos es fundamental, debe identificar el comportamiento de los distintos eventos que pueden suceder en una parada. Supóngase que se tienen sobre una vialidad tres líneas de microbús que pasan por ella, y a la mitad hay una parada donde se pueden bajar y cambiar a otro modo de transporte, entonces se pueden presentar las situaciones siguientes, que también se representan en la Figura 4-13.

- El usuario no deja la línea de un modo de transporte y continúa su viaje en la misma línea.
- El usuario baja de una línea por el arco de descenso, llega a la parada física y toma otra línea del mismo modo de transporte a través de un hiper-arco.
- El usuario baja de una línea llega a la parada física y sale a través de una transferencia a otro modo de transporte.
- El usuario baja de un modo de transporte, llega a través de una transferencia a la parada física de otro modo de transporte y puede subir a alguna línea del último modo de transporte.

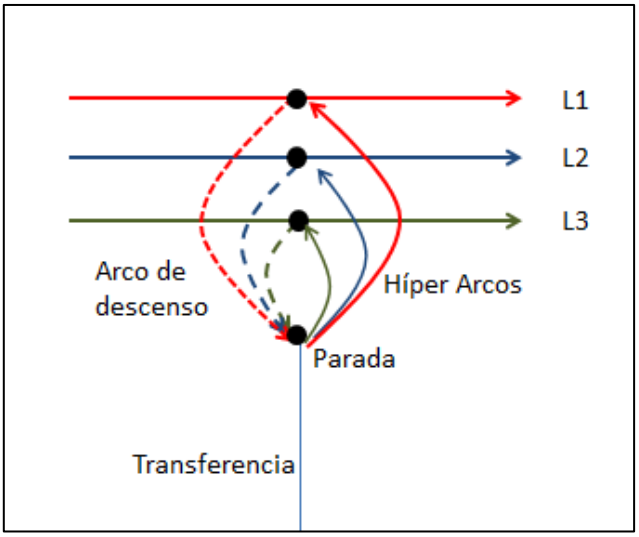


Figura 4-13 Esquema utilizado para la modelación de hiper arcos

El proceso de creación de los hiper-arcos es tardado pero necesario para el funcionamiento del algoritmo Shortest Viable Hyperpath in Multimodal Networks, el cual se describe como se implementó y programo en el capítulo 5. La Figura 4-14 a la Figura 4-16 presentan parte de la red de microbús a diferentes escalas, para mostrar el detalle y la complejidad de la formación de la hiper-red.

Al ampliar el zoom (Figura 4-15) se pueden apreciar las diferentes líneas que concurren en el nodo (parada) y al ampliar el zoom a 1:6 (Figura 4-16) se puede apreciar el hiper-arco. Se puede apreciar las diferentes líneas cuentan con un arco para abandonar la línea (bajada del vehículo de transporte público) para llegar a la parada y del nodo de la parada existen arcos que conectan con las diferentes líneas el cual es el hiper-arco.

Figura 4-14 Representación de hiper-arcos (zoom 1 : 10,000)

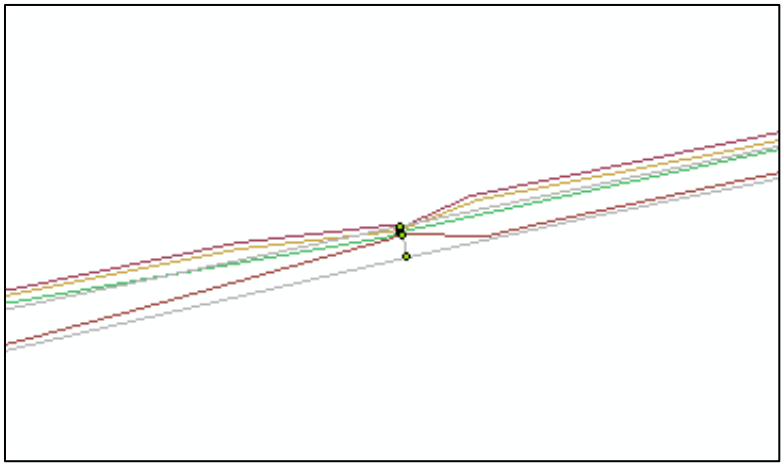


Figura 4-15 Representación de hiper-arcos (zoom 1 : 500)

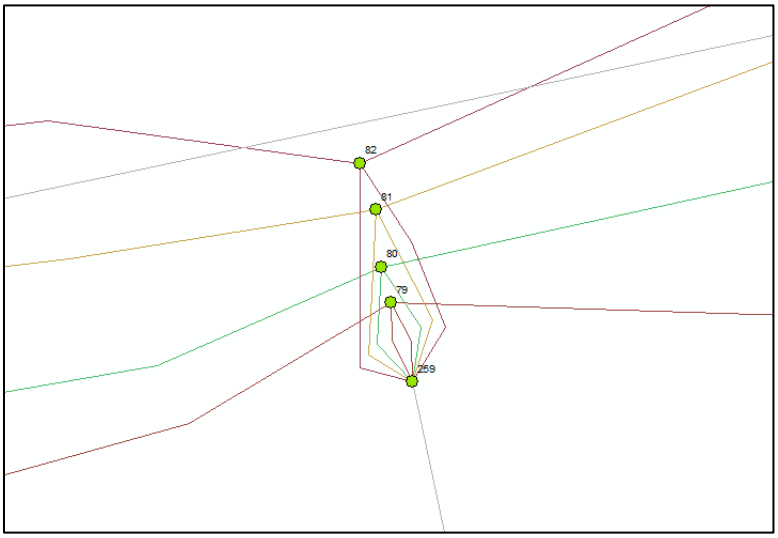


Figura 4-16 Representación de hiper-arcos (zoom 1 : 10)

4.3 Construcción de la hiper-red multimodal

Para promover un mejor uso de la red de transporte de la zona centro de la ciudad de Coyoacán, es necesario hacer uso de los diferentes modos de transporte que ofrece la zona de estudio, para lograrlo se requiere que el viajero cuente con información de los modos de transporte disponibles, una manera de hacer uso eficiente de ellos mejorando sus tiempos de traslado, es mediante sistemas de información y herramientas de obtención de rutas multimodales viables. Los usuarios que cuentan con esta información tienen una gran posibilidad de ser desalentados en la utilización del automóvil, el cual no es restringido totalmente sino integrado en un sistema de transporte multimodal.

La digitalización de cada una de las redes de los diferentes modos de trasporte (Metro, bus, auto, caminar, etc.) que se describen en el punto anterior, aún sin están conectadas entre sí como una

red multimodal, por lo que para obtener rutas con los diferentes modos de transporte, es necesario unir las redes por medio de arcos de transferencia modal.

En el área de estudio se hizo una integración de los diferentes modos de transporte existentes que son los modos Metro, microbús, RTP, trolebús, peatonal y automóvil, así también ubicaron los estacionamientos, y puntos de interés.

Los arcos de transferencia modal son necesarios para crear la red multimodal, los cuales permiten realizar los cambios modales; a continuación se describe que criterio se utilizó para la implementación de estos arcos en la red.

En la red digitalizada del Metro, las estaciones que cuentan con conexiones con otros modos de transporte que conectan directamente con el centro de Coyoacán, se crearon arcos de transferencia modal para conectar las paradas de microbús y estacionamientos cercanos (en la zona de estudio no se encontraron estacionamientos públicos cercanos a las estaciones del Metro), como se muestra un ejemplo en la Figura 4-17.

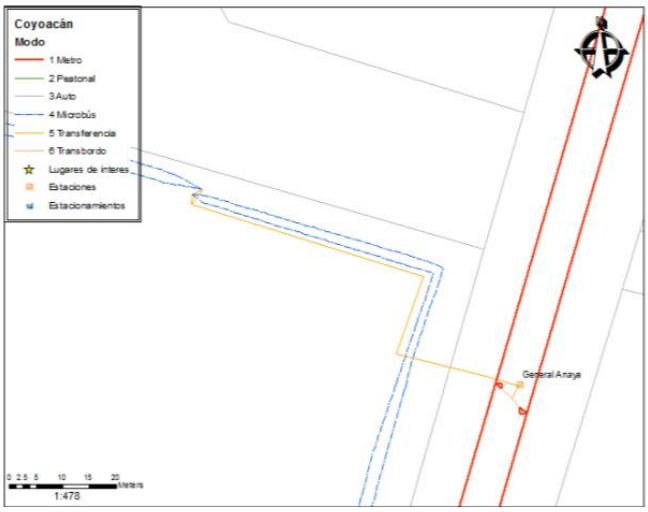


Figura 4-17 Ejemplo de conexión de los modos de transporte

Los microbuses en el centro de Coyoacán realizan paradas para ascenso y descenso de usuarios prácticamente en cualquier lugar sonde el usuario lo solicite. Este caso es difícil de representar en la red, por lo que, sólo se asignaron paradas donde se encontraron paradas.

Para tener una mejor representación de la operación de los microbuses, se plantearon paradas en esquinas donde los usuarios suelen subir y bajar del vehículo y en lugares aledaños a puntos de interés turístico, en estos puntos se buscó conectar las redes modales con arcos de transferencia modal como por ejemplo con la red de modo peatonal (Figura 4-18).

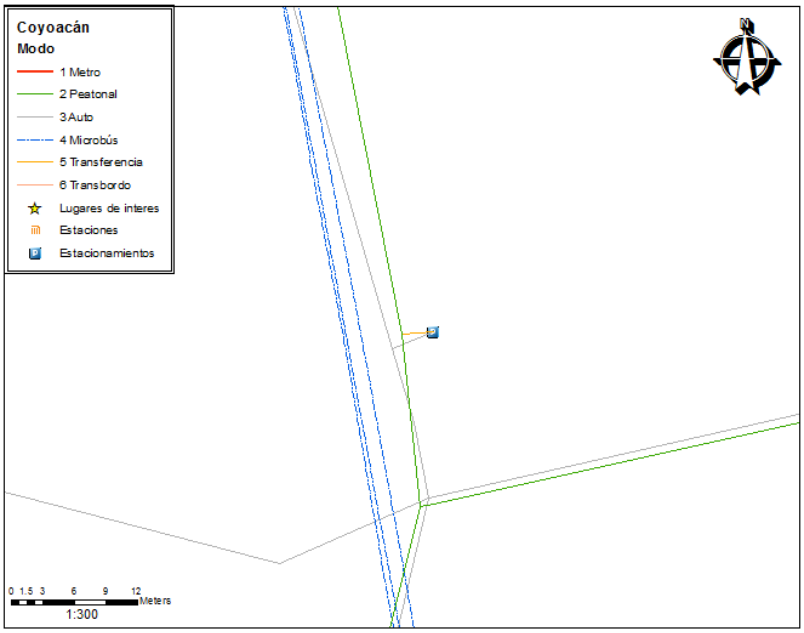


Figura 4-18 Ejemplo de conexión entre autobús, auto y peatonal

Se asumió, por simplicidad, que los estacionamientos son la única manera de acceder o dejar el modo auto desde cualquier otro modo que integra la red.

Para el caso de del trolebús y RTP, se localizaron los paraderos asignados, ya que estos dos modos de transporte si cuentan con los espacios designados para realizar paradas.

Para unir las distintas capas de los distintos modos de transporte, se utilizó la herramienta "merge" (unir), para crear una sola red que contiene los distintos modos de transporte existentes.

Una vez obtenida la red multimodal, fue necesario analizar los errores de conexión que se encontraron en la conexión de los arcos. A partir de este procedimiento se obtuvo una red multimodal sin errores de conexión, en donde pueden llevarse a cabo obtenciones de ruta más corta multimodales mediante el algoritmo Shortest Viable Hyperpath in Multimodal Networks, que se describió en el capítulo 3, y del cual se explica su implementación de bases de datos en el capítulo cinco.

4.4 Análisis de la operación de la zona de estudio

Un análisis de la zona de estudio después de digitalizar la red multimodal existente del centro de Coyoacán, permite observar de forma clara que vialidades son ocupadas principalmente por el de transporte público en a la red vial existente.

La red del modo Metro se encuentra en la periferia, funcionando como un servicio de aproximación por las avenidas principales que son Av. Universidad, Tlalpan y Popocatépetl, al igual que el sistema RTP cero emisiones, que ocupa la vialidad de División del Norte y la Ruta ordinaria que ocupa principalmente las vialidades de Héroes de 1947, Av. Hidalgo, Pérez Valenzuela y Xicotencatl.

La red de transporte público concesionado tiene sus principales puntos de conexión en tres estaciones del Metro de la línea 3 que son Viveros, M.A. de Quevedo y Coyoacán, y en la línea 2 en la estación General Anaya y Taxqueña, estos son los principales puntos de acceso que sirven para llegar al centro de Coyoacán, principalmente hacen "base" en la salida de estas estaciones. El transporte público concesionado circula por las arterias del centro de Coyoacán, ya que son principalmente microbuses y ocupan menos espacio por lo que pueden circular fácilmente en estas vialidades.

Existe un gran número de vehículos tanto de transporte público como privado que hacen uso de las vialidades principales como Miguel Ángel de Quevedo, Felipe Carrillo Puerto, Aguayo, París, Xicoténcatl, Hidalgo, Tres Cruces, División del Norte, Progreso y México (Figura 4-19), llegándose a encontrar hasta cuatro rutas de transporte público diferentes en una sola calle, más aparte el flujo vehicular privado y los peatones que intentan cruzar estas vialidades; esta situación ocasiona graves problemas de congestión vial en horas pico debido a que también se realizan paradas continuas llevando una competencia entre las diferentes rutas de microbuses e incluso entre vehículos de la misma ruta por ejemplo, para ganar pasaje y genera que las unidades invadan más carriles.

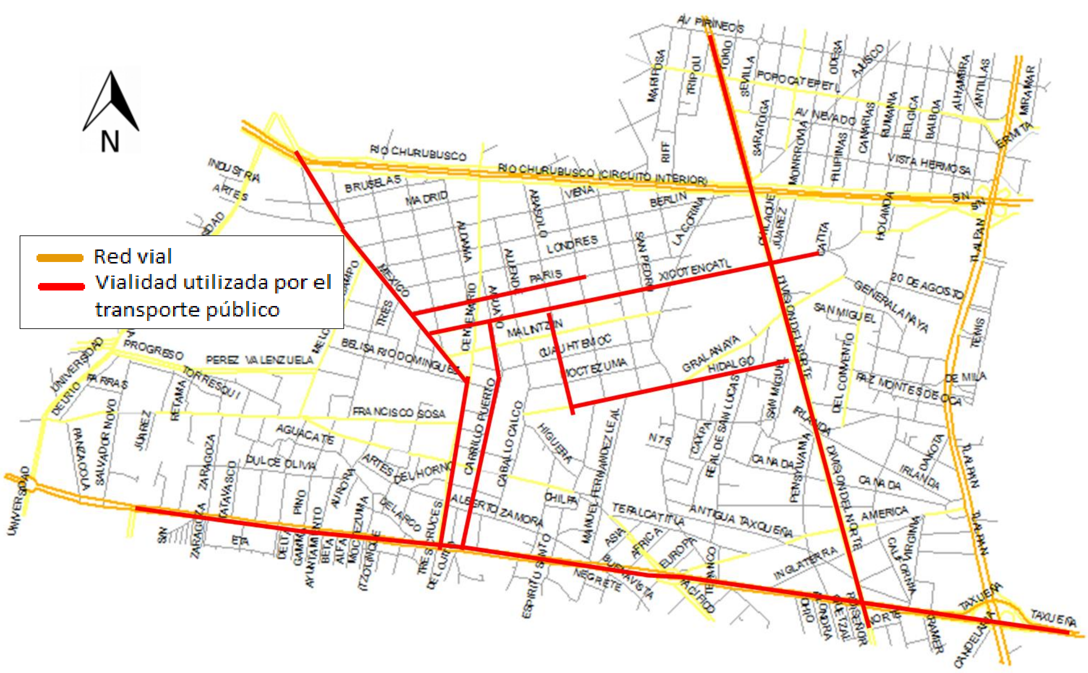


Figura 4-19 Principales calles por donde pasa el transporte público en el centro de Coyoacán

Se ha observado que en las vialidades de la zona centro de Coyoacán donde se encuentra mayor congestión vehicular, es donde convergen las distintas rutas que llegan a la zona centro haciendo uso de las calles principales, mientras que existen calles donde no hay servicio. Los automovilistas no cuentan con información sobre la ubicación y costo de estacionamientos públicos o lugares donde estacionarse, por lo que tienen que circular más tiempo, pagar más y/o estacionarse lejos de su destino.

4.5 Hacia una movilidad sustentable

El concepto de movilidad sustentable surge debido a la preocupación por los problemas medioambientales y sociales ocasionados por el uso excesivo del vehículo particular como medio de transporte generalizado.

La problemática con el uso del automóvil radica en la contaminación del aire, el consumo excesivo de combustibles, los efectos sobre la salud, la falta de estacionamientos y la generación de congestión sobre las vías de circulación; lo cual ha generado una preocupación creciente por encontrar alternativas que ayuden a evitar o minimizar los efectos negativos.

Las acciones de movilidad que se pueden llevar a cabo por parte de pasajeros, pueden ser desplazarse a pie, en bicicleta o en transporte público en lugar de en coche siempre que sea posible, compartir un coche entre varios compañeros para acudir al trabajo, etc. El desarrollo de tecnologías pueden ampliar las opciones de movilidad sustentable.

El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDEA (2012), un organismo Europeo que se enfoca en la mejora de la eficiencia energética, energías renovables y otras tecnologías bajas en carbono, menciona algunos de los objetivos que se buscan con la movilidad sustentable:

- Mejorar la calidad del aire mediante la reducción de emisiones nocivas generadas por los vehículos.
- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte.
- Disminuir la dependencia de los combustibles fósiles.
- Configurar un modelo de transporte más eficiente para mejorar el comportamiento del sistema.
- Mejorar la integración social de los ciudadanos, proporcionando accesibilidad a todos los ciudadanos.
- Incrementar la calidad de vida de los ciudadanos.
- No comprometer las condiciones de salud de los ciudadanos.
- Aportar más seguridad en los desplazamientos.

Una manera de ayudar a reducir estos efectos es la implementación de vehículos eléctricos, ya sea en el transporte público local o reglamentarlo para que los vehículos de distribución de mercancías tengan una plantilla de vehículos eléctricos.

El uso de vehículos eléctricos ofrecen las mejoras siguientes.

- Contribuye a la disminución de emisiones de CO2.
- Incorpora el sector del transporte al régimen de comercio de emisiones de CO2.
- Contribuye a reducir la emisión de contaminantes.

Las emisiones de CO2 generadas por un vehículo eléctrico y por un vehículo de motor diésel a los 100 Km, serían cercanas a 3.3 Kg CO2 y 13.3 Kg de CO2, respectivamente. El balance es claramente positivo para el vehículo eléctrico (Observatorio Tecnológico de la Energía, 2012). El consumo medio de los vehículos eléctricos actuales es de 14 kWh/100Km.

Los vehículos eléctricos, aparte de tener una elevada capacidad de reducir las emisiones de CO2, también tienen un impacto positivo en la reducción de otros gases contaminantes, quizá menos conocidos, pero muy perjudiciales para la salud, como son las partículas en suspensión (PM) y los óxidos de nitrógeno (NOx).

Con la implementación de los Sistemas Inteligentes de Transporte es posible reducir el impacto ambiental y social como describió en el capítulo 2, con los que se pueden implementar sistemas de gestión de estacionamientos, control de tráfico o Sistemas Avanzados de Información al Viajero (SAIV) para que el viajero cuente con información necesaria y pueda planear sus viajes.

Los modos alternativos de transporte también deben de implementarse para fomentar el transporte multimodal, creando centros de transferencia modales o facilitando esta transición entre un modo de transporte y otro. Como describió en el capítulo 1, el transporte es diverso y flexible por lo que no debe limitarse a uno o dos modos de transporte principales, hay modos de transporte adecuados para cada zona donde se desee implementar en combinación con políticas de transporte sustentable como las calles peatonales o de tráfico calmado, se pueden lograr mejoras sociales, económicas y reducción de congestión vehicular, que conlleva a la reducción de gases en la atmosfera.

Existen diferentes instituciones las cuales pueden otorgar financiamiento con el fin de reducir el impacto ambiental, en especial en el cambio climático, que buscan garantizar el acceso a mejores servicios de transporte, donde el transporte urbano estimule un mayor uso del transporte público como alternativa al transporte privado, seguridad de tránsito y asistencia técnica acerca de políticas y regulaciones para concesiones de transporte.

La Delegación Coyoacán, al reducir sus emisiones de gases contaminantes puede ser acreedora a los Bonos de Carbono, los cuales surgen del Protocolo de Kyoto; al cual se han comprometido varios países, entre ellos México; con el fin de reducir las emisiones de gases contaminantes a la atmosfera y reducir el deterioro a la capa de ozono.

5. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE HIPER RUTAS VIABLES EN REDES MULTIMODALES

En este capítulo se describen los ajustes que se realizaron a la red de estudio, y la estructura de datos utilizada para implementar el algoritmo de Hiper-Rutas Viables Mínimas en Redes Multimodales, para que este funcione de manera adecuada en la red de estudio. También se explica de qué manera se implementó el uso de bases datos que sirven para que el programa lea la información. En el punto 5.3 se explica cada una de las partes del programa de cálculo de hiper-rutas, así como las capacidades del equipo de cómputo y software utilizado.

5.1 Aplicación del algoritmo en la zona de estudio

Para poder implementar el algoritmo de cálculo de Hiper-Rutas Viables en Redes Multimodales, presentado en el punto 3.3.2 a la red de la zona de estudio, es necesario ajustar a la situación actual de operación que se tiene en el centro de Coyoacán, así como otras condiciones que se enlistan a continuación.

- No se cuenta con red para bicicletas, por lo cual este modo no será considerado.
- No se analizan taxis en la zona de estudio, se pretende realizar una propuesta que servirá para reducir el uso de automóvil y el taxi opera a similitud del uso del auto privado, por lo que no se incluye en este análisis.
- No se presentan modos de transporte público restringido, la configuración de la red en la zona de estudio no hace necesaria ninguna restricción.
- Se incluye la red de automóvil para la obtención de rutas pero será restringida, solo podrá iniciarse un viaje en automóvil y podrá hacer cambios modales si hay un estacionamiento que represente que el vehículo ha sido estacionado para realizar la transferencia modal.

La hiper-red multimodal del centro de Coyoacán se clasifico en cuatro grupos de modos de transporte (M1-M4), un grupo para indicar las transferencias modales (M5) y otro grupo para las transbordos en un mismo modo (M6) como se describe en la Tabla 5-1. Esta información está contenida en la base de datos y sirve para el cálculo de hiper-rutas y verificar que la ruta sea viable.

Tabla 5-1 Clasificación de modos de transporte en el centro de Coyoacán

Subconjunto	Descripción
M_1	Modos de transporte público de rieles: Metro
M_2	Modo de transporte públicos sobre la red vial: microbús, trolebús y RTP.
M_3	Modo privados con necesidades de estacionamiento: automóvil y moto
M_4	Modo peatonal
M_5	Transferencia modal
M_6	Transbordo

El diagrama de estados-s sirve para verificar si la ruta es viable, de este diagrama depende que arcos de los diferentes modos de transporte sean concatenados correctamente durante el cálculo de la híper-ruta.

Para la implementación en la zona de estudio del diagrama de estados-s, ha sido adecuado a las condiciones particulares del funcionamiento de la red de Coyoacán, el diagrama queda compuesto como se indica en la Figura 5-1. El diagrama tiene un modo restringido que es el modo privado (M3), por lo que en caso de iniciar un viaje en modo privado, no está permitido cambiar a cualquier otro modo si no es a través de un estacionamiento y no está permitido usar dos o más veces el modo privado (M3), una vez abandonado este modo, no se puede utilizar de nuevo.

Para simplicidad del diagrama de estados, se indican los modos M1, M2, M4, así como la transferencia modal y el transbordo M5 y M6 como no restringidos por lo que pueden ser utilizados 'n' cantidad de veces.

En el diagrama de estados un ejemplo es que un usuario inicie el viaje por autobús (o), seguir usando el modo autobús o hacer una transferencia modal para cambiar a modo Metro (1), al final de su recorrido hacer un cambio modal para abandonar el modo Metro y terminar el viaje caminando.

En otro ejemplo un usuario puede iniciar en modo automóvil (o), hasta hacer una transferencia modal dejando el vehículo en un estacionamiento (2), realizar otra transferencia modal a microbús (1), hasta llegar al destino (D).

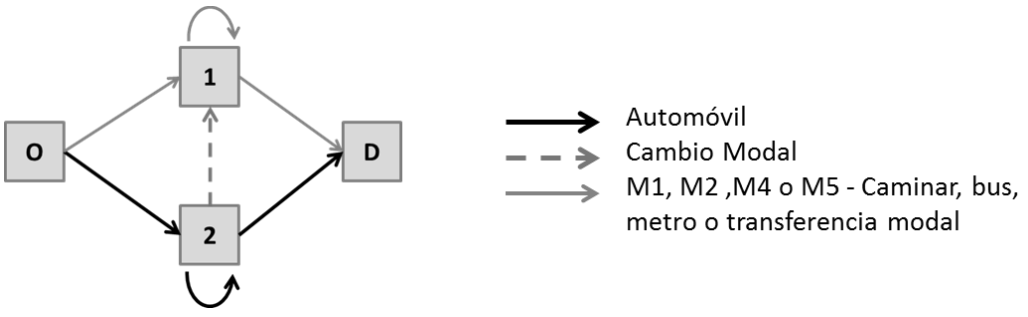


Figura 5-1 Diagrama de estados-s (Opción 1).

En la presente tesis solo se utiliza el diagrama de estados-s de la Figura 5-1, sin embargo se plantea la situación de usar dos diagramas de estados diferentes, uno para iniciar el viaje con modo auto (p.ej. un usuario puede salir de su casa en auto) y otro para terminar con modo auto, como se muestra en el diagrama de estados de la Figura 5-2 (p.ej. un usuario que requiere regresar a su casa y ha dejado el auto en un estacionamiento).

Para poder implementar el segundo diagrama de estados-s, es necesario tener información del estacionamiento donde se dejó el auto para poder realizar una obtención de ruta condicionada a visitar el estacionamiento donde se encuentra el auto y llegar al destino, por lo cual solo se esquematiza el diagrama de estados-s para una desarrollo futuro.

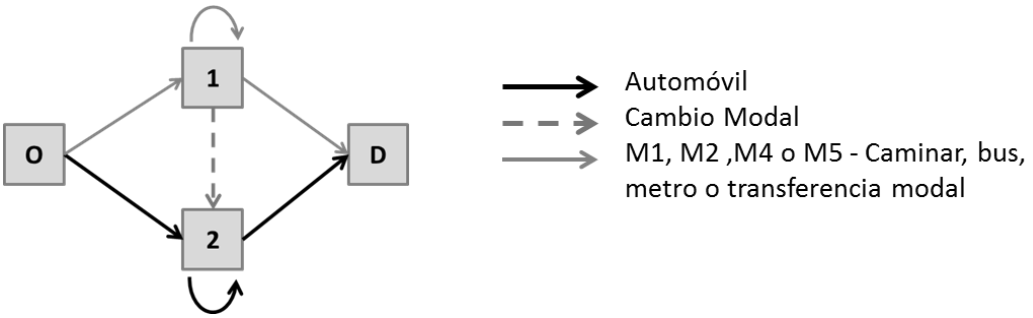


Figura 5-2 Diagrama de estados-s (Opción 2).

5.2 Recopilación y tratamiento de la base de datos de la red

La información asociada a la red se obtuvo mediante un levantamiento en campo, esta información trata de ser representativa, debido a que no se cuenta con el equipo de trabajo necesario para la realización del levantamiento de frecuencias de paso de los microbuses, se realizaron conteos los días viernes y sábados con fechas diferentes, en un horario entre 3:00pm y 5:00pm que es el horario en que más visitantes llegan al centro de Coyoacán.

En la Figura 5-3 se muestran la ubicación de las estaciones donde se llevó a cabo el conteo de frecuencias de paso de microbuses, trolebús y RTP. El resumen de los resultado de los datos recopilados se muestran en la Tabla 5-2

Figura 5-3 Estaciones para conteo de frecuencias

Tabla 5-2 Velocidades y frecuencias levantadas

Modo	Ruta/Línea	Velocidad promedio (Km/h)	Frecuencia (Veh/Hr)
Peatonal	Caminar	4	NA
Metro	Línea 2	60	27
	Línea 3	60	24
	Línea 12	60	16
Microbús	Microbús: SRuta 1-58	40	12
	Microbús: SRuta 34 1,	40	24
	Microbús: SRuta 1-59	40	12
	Microbús: SRuta 1-158r	50	15
	Microbús: SRuta 34-1 1,	40	16
	Microbús: SRuta 34-2	40	15
	Microbús: SRuta 43-04	50	16
	Microbús: SRuta 2-39r	40	15
	Microbús: SRuta 1	40	16
	Microbús: SRuta 1-2	50	16
	Microbús: SRuta 1-3	40	16
	Microbús: SRuta 1-46	40	20
RTP	Cero Emisiones N-S	40	25
	Cero Emisiones S-N	40	25
	17F	50	20
	116A	40	20
Trolebús	División del Norte	40	12
	M.A. Quevedo	40	13

Para la red de auto se asignaron velocidades desde 5 Km/h hasta 60 Km/h dependiendo el tipo de vialidad, la cual puede ser primaria, secundaria o local, para el tipo de vialidad se utilizó la información contenida en la red de INEGI al 2010, aparte fue considerado si la calle es empedrada, ya que este factor reduce considerablemente la velocidad de operación de los vehículos que transitan por ella.

Para los recorridos de los peatones, se ha considerado una velocidad promedio de 70 m/min (4 Km/h), de acuerdo con estudios revisados sobre movilidad (Finnis & Walton, 2008).

El tiempo de recorrido por arco fue se calculó tomando en cuenta las velocidades descritas anteriormente y la longitud de cada arco con la formula $t=d/v$, donde t es tiempo, d es distancia y v es velocidad. Para el cálculo de longitud de cada arco fue utilizada la herramienta de ArcMap "Calculate geometry / distance (Km) ".

La base de datos fue creada exportando la tabla de atributos asociada a la red en el GIS como un archivo "dbf". Se editó el archivo "dbf" de la red creada en Excel, eliminándose acentos o caracteres no soportados por el manejador de base de datos y se guardó como archivo separado por comas "cvs". En PostgreSQL se creó una base de datos con los campos correspondientes para importar el archivo "cvs".

La tabla de atributos de la red cuenta con un campo identificador "Dir" para cada registro, este campo sirve para identificar cada arco de la red dependiendo de su construcción topológica (figura 5-4), cuenta con un valor cero si es que el arco representa doble sentido; uno, si ha sido dibujado el arco en dirección al sentido de la vía y menos uno para el caso en que el arco haya sido dibujado en sentido opuesto a la vía.

FID	Shape	OID_	Name	Shape_Leng	Frec_tarde	Tiem_abord	Dir	Precio	Modo	Arco_A	H_Arco
708	Polyline ZM	708	OCEANIA	139.807032	0	0	0	0	3	0	0
709	Polyline ZM	709	VICENTE GARCIA TORRES	133.696757	0	0	0	0	3	0	0
710	Polyline ZM	710	MEDITERRANEO	66.862928	0	0	0	0	3	0	0
711	Polyline ZM	711	S/N	119.141414	0	0	1	0	3	0	0
712	Polyline ZM	712	RIO CHURUBUSCO	86.619531	0	0	1	0	3	0	0
713	Polyline ZM	713	JOSEFA ORTIZ DE DOMINGUE	154.265172	0	0	1	0	3	0	0
714	Polyline ZM	714	PINO	113.341356	0	0	-1	0	3	0	0
715	Polyline ZM	715	SALVADOR NOVO	246.564708	0	0	0	0	3	0	0
716	Polyline ZM	716	PANZACOLA	307.578854	0	0	0	0	3	0	0
717	Polyline ZM	717	SALVADOR NOVO	148.91729	0	0	0	0	3	0	0
718	Polyline ZM	718	JUAREZ	160.071016	0	0	0	0	3	0	0
719	Polyline ZM	719	FLORIDA	141.089904	0	0	0	0	3	0	0
720	Polyline ZM	720	DEL PEDREGAL	55.961917	0	0	0	0	3	0	0
721	Polyline ZM	721	HORTENSIA	126.955145	0	0	-1	0	3	0	0
722	Polyline ZM	722	ZARAGOZA	204.294898	0	0	0	0	3	0	0
723	Polyline ZM	723	PRESIDENTE CARRANZA(PRE	79.753558	0	0	1	0	3	0	0
724	Polyline ZM	724	PRESIDENTE CARRANZA(PRE	95.104005	0	0	1	0	3	0	0
725	Polyline ZM	725	FRANCISCO SOSA	107.468853	0	0	0	0	3	0	0
726	Polyline ZM	726	AGUACATE	113.706084	0	0	0	0	3	0	0
727	Polyline ZM	727	AGUACATE	107.388938	0	0	0	0	3	0	0
728	Polyline ZM	728	AGUACATE	17.062538	0	0	0	0	3	0	0
729	Polyline ZM	729	AGUACATE	62.161089	0	0	0	0	3	0	0
730	Polyline ZM	730	PROGRESO	361.547842	0	0	-1	0	3	0	0
731	Polyline ZM	731	PROGRESO	177.562994	0	0	1	0	3	0	0
732	Polyline ZM	732	PROGRESO	14.402979	0	0	0	0	3	0	0
733	Polyline ZM	733	MARGARITAS	127.88149	0	0	-1	0	3	0	0

0 (0 out of 2055 Selected)

Figura 5-4 Tabla de la base de datos de la red en el GIS

En la base de datos es necesario tener un registro por cada calle y sentido vial, que cuenten todos con el mismo orden topológico, por lo que es necesario duplicar cada registro con dir=0 e invertir los campos “fromID” y “toID” de los registros con dir =-1 para representar ambos sentidos en la base de datos y así obtener los registros necesarios para que la red sea leída correctamente.

Para este proceso de adecuación de la base de datos, se utilizó una rutina que se programó en lenguaje Java; esta rutina lee y procesa la base de datos en PostgreSQL y reescribe una nueva tabla con los valores correspondientes. La rutina de este programa puede consultarse en el **Anexo C.**

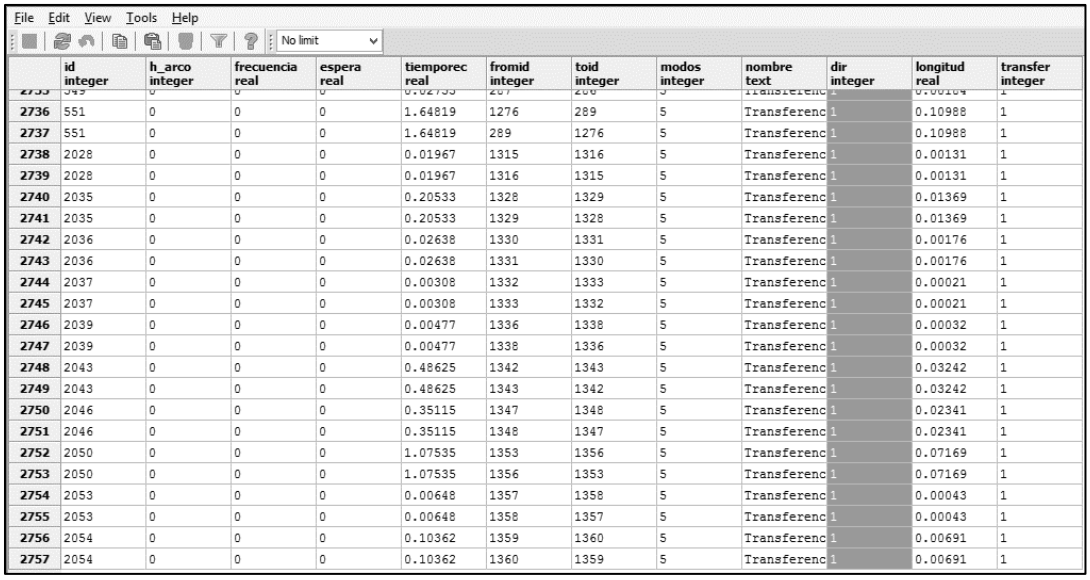
La Figura 5-5 muestra que la red original contiene 2078 registros y el campo “DIR” aun cuenta con campos con valor cero. Después de haber duplicado los registros que tienen cero en el campo “DIR” queda una tabla de 2714 registros con los campos de la columna “DIR” con valor uno (Figura 5-6).

File Edit View Tools Help

No limit

	id integer	h_arco integer	frecuencia real	espera real	tiemporec real	fromid integer	toid integer	modos integer	nombre text	dir integer	longitud real	transfer integer
2034	2033	0	0	0	0.33274	1324	1325	6	''	0	0.02218	0
2035	2034	0	0	0	0.3278	1326	1327	6	''	0	0.02185	0
2036	2035	0	0	0	0.20533	1328	1329	5	Transferenc	0	0.01369	1
2037	2036	0	0	0	0.02638	1330	1331	5	Transferenc	0	0.00176	1
2038	2037	0	0	0	0.00308	1332	1333	5	Transferenc	0	0.00021	1
2039	2038	0	0	0	0.0771	1334	1335	6	''	0	0.00514	0
2040	2039	0	0	0	0.00477	1336	1338	5	Transferenc	0	0.00032	0
2041	2040	0	0	0	0.06088	1339	1337	2	Caminar	0	0.00406	0
2042	2041	0	0	0	0.03872	1338	1339	2	Caminar	0	0.00258	0
2043	2042	0	0	0	0.38181	1340	1341	2	Caminar	0	0.02545	0
2044	2043	0	0	0	0.48625	1342	1343	5	Transferenc	0	0.03242	1
2045	2044	0	0	0	0.69952	1345	1344	2	Caminar	0	0.04663	0
2046	2045	0	0	0	0.77824	1345	1346	2	Caminar	0	0.05188	0
2047	2046	0	0	0	0.35115	1347	1348	5	Transferenc	0	0.02341	0
2048	2047	0	0	0	1.66141	1349	1350	2	Caminar	0	0.11076	0
2049	2048	0	0	0	0.57266	1350	1351	2	Caminar	0	0.03818	0
2050	2049	1	20	0	0.00689	1354	1352	4	Microbus: S	1	0.0046	0
2051	2050	0	0	0	1.07535	1353	1356	5	Transferenc	0	0.07169	1
2052	2051	0	0	0	0.16981	1356	1354	6	''	0	0.01132	0
2053	2052	0	0	0	0.15373	1355	1356	6	''	0	0.01025	0
2054	2053	0	0	0	0.00648	1357	1358	5	Transferenc	0	0.00043	0
2055	2054	0	0	0	0.10362	1359	1360	5	Transferenc	0	0.00691	1

Figura 5-5 Tabla en PostgreSQL original



File Edit View Tools Help — No limit

	id integer	h_arco integer	frecuencia real	espera real	tiemporec real	fromid integer	toid integer	modos integer	nombre text	dir integer	longitud real	transfer integer
2736	551	0	0	0	1.64819	1276	289	5	Transferenc	1	0.10988	1
2737	551	0	0	0	1.64819	289	1276	5	Transferenc	1	0.10988	1
2738	2028	0	0	0	0.01967	1315	1316	5	Transferenc	1	0.00131	1
2739	2028	0	0	0	0.01967	1316	1315	5	Transferenc	1	0.00131	1
2740	2035	0	0	0	0.20533	1328	1329	5	Transferenc	1	0.01369	1
2741	2035	0	0	0	0.20533	1329	1328	5	Transferenc	1	0.01369	1
2742	2036	0	0	0	0.02638	1330	1331	5	Transferenc	1	0.00176	1
2743	2036	0	0	0	0.02638	1331	1330	5	Transferenc	1	0.00176	1
2744	2037	0	0	0	0.00308	1332	1333	5	Transferenc	1	0.00021	1
2745	2037	0	0	0	0.00308	1333	1332	5	Transferenc	1	0.00021	1
2746	2039	0	0	0	0.00477	1336	1338	5	Transferenc	1	0.00032	1
2747	2039	0	0	0	0.00477	1338	1336	5	Transferenc	1	0.00032	1
2748	2043	0	0	0	0.48625	1342	1343	5	Transferenc	1	0.03242	1
2749	2043	0	0	0	0.48625	1343	1342	5	Transferenc	1	0.03242	1
2750	2046	0	0	0	0.35115	1347	1348	5	Transferenc	1	0.02341	1
2751	2046	0	0	0	0.35115	1348	1347	5	Transferenc	1	0.02341	1
2752	2050	0	0	0	1.07535	1353	1356	5	Transferenc	1	0.07169	1
2753	2050	0	0	0	1.07535	1356	1353	5	Transferenc	1	0.07169	1
2754	2053	0	0	0	0.00648	1357	1358	5	Transferenc	1	0.00043	1
2755	2053	0	0	0	0.00648	1358	1357	5	Transferenc	1	0.00043	1
2756	2054	0	0	0	0.10362	1359	1360	5	Transferenc	1	0.00691	1
2757	2054	0	0	0	0.10362	1360	1359	5	Transferenc	1	0.00691	1

Figura 5-6 Tabla en PostgreSQL modificada

El proceso descrito en este capítulo sirvió para crear la red de estado actual y la red con propuesta de transporte sustentable, de esta última red se presentan sus características en el capítulo 6. A continuación en la Tabla 5-3 se presentan el número de nodos, arcos e hiper-arcos con los que cuenta cada red.

Tabla 5-3 Numero de arcos y nodos utilizados en las redes de la zona de estudio

	Red Actual	Red con propuesta de Transporte Sustentable
Arco	2078	2124
Total de registros duplicados para arcos de doble sentido	2714	2870
Nodos	1367	1396
Hiper-arcos	85	94

5.3 Programación del algoritmo "Shortest Viable Hyperpath in Multimodal Network"

En este apartado se describen cuáles son las herramientas de software utilizadas para ejecutar el programa, así como las capacidades técnicas del equipo de cómputo utilizado, ya que de estas capacidades depende la rapidez de procesamiento y cálculo de la ejecución del algoritmo. Posteriormente se describe el funcionamiento del programa.

Equipo de cómputo

Computadora con procesador de 4 núcleos Intel Corei5, 4Gb de memoria RAM y Sistema Operativo Windows 8.

Software utilizado:

- El compilador utilizado es **Eclipse** Java EE IDE for Web Developers. Versión: Juno Service Release 1, Build id: 20120920-0800.
- Manejador de bases de datos utilizada es **PostgreSQL** versión 1.16.1
- Sistema de Información Geográfica (SIG):
  - ✓ **ArcGIS 10.0**: Se utilizó para creación y análisis de la red, así como para el despliegue de los resultados obtenidos por el programa de obtención de rutas.
  - ✓ **ArcGIS 9.3**: Se utilizó para crear la capa de nodos y los campos "FromNode" y "ToNode" mediante el script "Create Nodes" desarrollado por el "Laboratory for Spatial Analysis, G.I.S. and Thematic Cartography, University of Thessaly, Greece". El script fue diseñado e implementado con Visual Basic (VB) en ArcGis 9.x.

Programa "Shortest Viable Hyper Path in Multimodal Networks"

El lenguaje que se utiliza para programar el algoritmo es Java, se utiliza este lenguaje debido a que maneja una estructura de programación orientada a objetos (POO), lo cual permite una programación estructurada; es un lenguaje sencillo y se puede utilizar en diferentes sistemas operativos.

La estructura del programa realizado a partir del algoritmo Shortest Viable Hyperpath in Multimodal Networks (Lozano et al., 2002), cuenta una clase principal llamada "**Principal"**, y cuatro métodos "**SVHP",** "**arcConcatenation", "harcConcatenation" y "leeResultados"**, los cuales se explican a continuación:

1. **Principal**.

   La clase principal se encarga de asignar las variables iniciales que debe ingresar el usuario para que el programa pueda obtener la ruta deseada (Figura 5-7), llama al método "SVHP" para analizar la base de datos de la red.

   Las variables iniciales que solicita el programa son origen (número de nodo), destino (número de nodo), número de transferencias modales (valor numérico 0 a 5) y si se desea o no usar automóvil (valor numérico 0 o 3 respectivamente).

*principal.java | *SVHP.java | arcConcatenation.java | *hArcConcatenation.java | leeResultados.java

```
1
2  public class principal {
3
4      public static void main(String[] args) {
5
6          SVHP svhp = new SVHP();
7
8          svhp.setOrigen(150);
9          svhp.setDestino(219);
10         svhp.setConauto(3);
11         svhp.setK(2);
12         svhp.ejecutar();
13         System.out.println();
14         System.out.print("Fin");
15     }
```

Figura 5-7 Código java, clase principal

La ventaja que se tiene al filtrar la red de automóvil en la lectura de la red es que se reduce considerablemente el tiempo de cálculo para obtener la ruta mínima. Por un lado, de acuerdo con el diagrama de estados el auto solo puede ser utilizado al comienzo del recorrido, al abandonarlo está restringido regresar a él y por otro lado si se comienza un viaje en otro modo que no sea auto ya no está permitido usar el modo auto, por lo tanto, si se comienza en otro modo no es necesario analizar los arcos del modo auto.

En un ejemplo de obtención de ruta comenzando en una línea del Metro a un punto en el centro de Coyoacán sin filtrar la red de auto, el tiempo de cálculo aproximado es de 30 segundos, pero filtrando la red de modo auto, el tiempo de cálculo aproximado es de 2 segundos.

2. SVHP

El método SVHP realiza diferentes funciones:

Primero crea las variables que se usaran para leer la red, establece las variables iniciales indicadas en el procedimiento “Principal”, se guarda el nodo destino como primer elemento de la lista llamada *Qnow*, se crea una conexión a la base de datos PostgreSQL y comienza a leer cada elemento de la estrella entrante (*BS*) del primer nodo de la lista *Qnow*.

A continuación se determina si cada elemento de *BS* es arco o hiper-arco (0 y 1, respectivamente); si es un arco, llama al método “arcConcatenation” y si es un hiper arco, es decir, si se encuentra en una parada de autobús o Metro, llama al método “hArcConcatenation”.

El método arcConcatenation agrega nodos por visitar en la lista llamada *Qnow* de donde se van tomando valores para cada estrella saliente (*BF)* y realizar la lectura de la red.

Posteriormente, si en la lectura de la red es encontrado el nodo origen con un tiempo estimado, se guarda este tiempo en una variable llamada “costoOrigen” y se continúa ejecutando un bucle hasta que se vacíe *Qnow* o que ya no se pueda mejorar el tiempo en el origen “costoOrigen”.

Si el tiempo de viaje no puede ser mejorado, se guarda la mejor ruta encontrada con *N* número de transferencias modales como un objeto, el cual contiene toda la información de la ruta, o en el caso de que no encuentre una ruta hasta el origen se guarda un objeto vacío el cual será un indicador de que en este número *N* de transferencias modales no se encontró una ruta origen destino; los objetos aquí mencionados se asignan a una lista llamada “*conjuntoParetoOptimal*”.

Una vez analizado para cero transferencias modales, toma como referencia el mejor tiempo encontrado y comienza a calcular una nueva ruta con una transferencia modal más (k+1) que mejore el último mejor tiempo encontrado (*lastlabel*). Este proceso se sigue ejecutando hasta que se llegue al número máximo de transferencias modales permitidas (*k*) indicadas por el usuario al inicio del procedimiento o no pueda ser mejorado el tiempo de viaje.

Finalmente se llama a la función "leeResultados" para leer la lista "*conjuntoParetoOptimal"* que contendrá 'k' elementos y desplegar el conjunto atractivo para ese par origen-destino.

Para más detalle del método puede consultarse el código del programa en el **Anexo A**

3. arcConcatenation

Una vez que se ha verificado que la ruta es viable de los estados de la red y el tiempo calculado sea mejorado, el procedimiento arcConcatenation realiza la función de concatenar los arcos que se van leyendo de la estrella entrante.

Dependiendo de los atributos del arco, es procesado por el método arcConcatenation, verifica que la ruta es viable de acuerdo al diagrama de estados (Figura 5-1) que se describió en el punto 5.1.

Si la concatenación es viable se verifica que el número de transferencias modales resultantes de la concatenación de la ruta actual con este arco, la cual debe ser menor al número de transferencias máximas permitidas, si se cumplen estas condiciones se puede continuar el procedimiento para calcular el costo (tiempo), si este mejora el tiempo, se concatena el arco.

Si la concatenación no es viable, el método es interrumpido y no es necesario realizar más operaciones.

La lógica que se usa en la concatenación del arco es de la siguiente manera: si el arco que se está concatenando no había sido leído se agrega como nuevo elemento en una lista con todas sus propiedades; en caso contrario si ya había sido leído y la nueva ruta mejora ese tiempo, el arco que se concatena busca en la lista la posición donde está guardado y remplaza sus datos con el nuevo valor.

Para más detalle del método puede consultarse el código del programa en el **Anexo B**

4. hArcConcatenation

El método hArcConcatenation Realiza la función de concatenar los hiper-arcos que se van leyendo de la estrella entrante. Cuando se encuentra un hiper-arco se lee la estrella saliente del nodo cola para poder determinar la cardinalidad del hiper-arco.

Una vez obtenidos los arcos que conforman el hiper-arco se ordenan de menor a mayor en función del costo mediante el algoritmo “Bubble Sort”, y así poder usar el algoritmo de cálculo de hiper-arcos.

Una vez obtenido el costo del hiper-arco, se concatena de la siguiente manera: si el h-arco que se está concatenando no había sido leído se agrega como nuevo en una lista con todas sus propiedades; en caso contrario si ya había sido leído y la nueva ruta mejora el tiempo, el arco que se concatena busca en la lista la posición donde está guardado y remplaza sus datos con el nuevo valor.

El método hArcConcatenation no necesita revisar que la ruta es viable ya que el único modo restringido utilizado es el modo auto.

El algoritmo de este método fue modificado respecto al algoritmo original. El algoritmo original calcula el hiper-arco una vez que ya han sido leídos por lo menos una vez los arcos que lo componen; y el algoritmo modificado realiza el cálculo para los hiper-arcos que han sido leídos, independientemente si se encuentran todos los arcos que conforman el hiper-arco. En la Figura 5-8 se presenta el pseudo-código del algoritmo modificado el cual fue programado.

Procedimiento h-arc-concatenation $(u, L(u), c, \emptyset, \theta, L_u^*, \Phi_u^*, val)$
$cardinalidadHa := \varnothing$; $listaHA := \varnothing$;
Begin
for each $i \in FS(i)$ ***do*** {
  if $([i,s] \in nodosVisitados)$ {
    $cardinalidadHa := cardinalidadHa \cup \{[i,s]\}$
    $listaHa := listaHa \cup \{[i,s]\}$
  }
}
Ordena $listaHa$ de menor a mayor

/ *Agrega solo los híper arcos visitados a la lista cardinalidadHa*
/ *Agrega solo los híper arcos visitados a la listaHa*
/
/ *Se agrega procedimiento para ordenar elementos de menor a mayor dependiendo del costo*

$\boldsymbol{Sort}(L(u); k := 2; L_u^* := \{v_1\}, \Phi_u^* = \emptyset_{v_1}, val = (\theta/\Phi_u^*) + C_{v_1}$
while $k = |L(u)| and\ C_{v_k} < val$ ***do***
  begin
    $\Phi_u^* := \Phi_u^* + \phi_{v_k}$
    $val := val - (val - C_{v_k})\phi_{v_k}/\Phi_u^*$
    $L_u^* := L_u^* \cup \{v_k\}$
    $k = k + 1$
  End

/ *Procedimiento original para calcular el tiempo recorrido hasta el nodo analizado. Calcula entre las distintas opciones que ofrece el híper arco definido al principio de este procedimiento y agrega el conjunto preferido en* L_u^*

if $([j,s] \notin nodosVisitados)$ {
$V_s^*(i) = C^*(e)$
$w_s(i) = w_{s_{x(j)}}$
$SA_s(i) = e$
$ST_s(i) = State(e)$
$Qnow = Qnow \cup \{[j,s]$
else {
  if $(C^*(e) < V_{s_y}^*(i))$ {
    $V_s^*(i) = C^*(e)$
    $w_s(i) = w_{s_{x(j)}}$
    $SA_s(i) = e$
    $ST_s(i) = State(e)$
      if $(C^*(e) < V_{s_y}^*(i))$ {
        $Qnow = Qnow \cup \{[j,s]\}$
      }
  }
}
end

/ *Si el nodo no ha sido visitado, se crea un registro nuevo y se guardan sus elementos calculados y el nodo se concatena con Qnow*

/ *Si el nodo ya ha sido visitado, se compara el costo y si es menor se remplaza y el nodo se concatena con Qnow*

Figura 5-8 Pseudo código del procedimiento "concatenacion de h-arco"

Dónde:

- nodosVisitados - Va guardando registro en una lista de los nodos que han sido visitados.
- listaHa - lista temporal que contiene los nodos de la estrella saliente de j que ya han sido visitados al menos una vez.
- cardinalidadHa – Número de elementos del hiper-arco que han sido calculados.

Este procedimiento logra que el cálculo de la ruta prosiga hasta encontrar el origen, en caso de hallarlo, no necesita esperar a que se calculen todos los arcos que conforman el hiper-arco.

Para más detalle del método puede consultarse el código del programa en el **Anexo C**

5. leeResultados

El método leeResultados funciona al final del programa, una vez obtenida la lista completa del conjunto atractivo (rutas encontradas para k transferencias modales) es llamado este método, el cual se encarga de leer los resultados desde el origen al destino como una estructura de lista ligada. Cada objeto guardado (nodo que ha sido leído) cuenta con un índice el cual indica en qué posición de la lista se encuentra el siguiente nodo que conforma la ruta o conjunto de rutas hasta llegar al destino.

Se utiliza una rutina basada en el algoritmo de lectura de red por profundidad, en el cual se avanza de vértice en vértice, marcando cada vértice visitado. La búsqueda siempre avanza hacia un vértice no marcado, internándose “profundamente” en el grafo sin repetir ningún vértice. Cuando se alcanza un vértice cuyos vecinos han sido marcados, se retrocede al vértice anterior visitado y se avanza desde éste. La salida de este procedimiento tiene una estructura de árbol.

Al final el programa entrega una lista con el identificador de los arcos que forman la ruta o conjunto de rutas (Figura 5-9), su tiempo de recorrido y el nombre de las calles y los modos utilizados (Figura 5-10).

```
---------COMIENZA LECTURA DE RESULTADOS--------


CONJUNTO PARETO OPTIMAL

El tiempo con 0 transferencias es: 0.0
El conjunto de rutas es:


El tiempo con 1 transferencias es: 0.0
El conjunto de rutas es:


El tiempo con 2 transferencias es: 13.362509870910003
El conjunto de rutas es:
353, 338, 377, 2031, 431, 274, 69, 72, 75, 210, 153, 156, 313, 68, 249, 532, 452, 540, 542, 539, 475,
314, 74, 246, 532, 452, 540, 542, 539, 475,

Fin
```

Figura 5-9 Ejemplo de conjunto de rutas encontradas con el tiempo esperado y id de los arcos de la red

```
CONJUNTO PARETO OPTIMAL

El tiempo con 0 transferencias es:  0 . 0
El conjunto de rutas es:


El tiempo con 1 transferencias es: 15.430591811000001
El conjunto de rutas es:


El tiempo con 2 transferencias es: 14.1936979674495
El conjunto de rutas es:
Transferencia,
AQUI PUEDE CONSIDERAR 2 OPCIONES
Microbus: SRuta 34, Transferencia, Caminar,
Microbus: SRuta 43-04, Transbordo,
AQUI PUEDE CONSIDERAR 2 OPCIONES
Microbus: SRuta 1-58, Transferencia, Caminar,
Microbus: SRuta 1-3, Transferencia, Caminar,
```

Figura 5-10 Conjunto de rutas encontradas con el tiempo esperado e instrucciones de los modos utilizados

Debido a que los modos de transporte público no tienen restricciones, el programa no incluye el método “Determine-s” incluido en el algoritmo original.

Estructura de datos utilizada

Se utilizan objetos para la lectura y guardado de datos de los nodos analizados. Cada objeto cuenta con la información de cada nodo analizado.

(Nodo**,** Estado**,** Arco sucesor**,** Apuntador**,** Nombre**,** Costo**,** Transferencias**)**

- Nodo: Nodo analizado.
- Estado: Estado del nodo analizado (basado en el diagrama de estados).
- Arco Sucesor: Id del arco sucesor asociado al nodo analizado.
- Apuntador: Número entero asociado a la posición en la lista donde se encuentra el nodo sucesor.
- Nombre: Nombre del arco (calle, nombre de ruta de micro o nombre de modo utilizado).
- Costo: Tiempo acumulado al nodo analizado.
- Transferencias: Número de transferencias utilizadas hasta el nodo analizado.

Como no se conoce el tamaño determinado de la lista, hay actualización de elementos y de sus valores constantemente, se utiliza una estructura de “lista ligada” lo cual permite tener una estructura de datos dinámica.

Para manejar una lista es necesario contar con un apuntador al primer elemento de la lista, "head". Las ventajas de las listas ligadas son que:

- Permiten que sus tamaños cambien durante la ejecución del programa
- Proveen una mayor flexibilidad en el manejo de los datos.

Una lista ligada es un grupo de datos organizados secuencialmente, cada elemento es un nodo que contiene el dato y además una liga al siguiente dato. Estas ligas son variables ya que contienen la(s) dirección(es) de los datos contiguos o relacionados.

Se programó un arreglo para que un elemento pueda apuntar a múltiples elementos, esta estructura sirve a la hora de que se crea una hiper-ruta donde se encuentren dos o más opciones.

El proceso del análisis para 'h' transferencias modales entrega una lista con un objeto por nodo analizado (Figura 5-11).

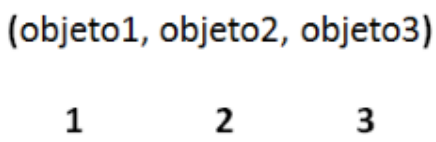


Figura 5-11 Esquema de creación de las listas por cada nodo.

Ejemplo (Figura 5-12**)**: Considérese que el origen es Objeto1 y el destino el Objeto 4, el programa va guardando la ruta en el Objeto4 con un apuntador al registro 1, el Objeto2 que se encuentra en el registro1 contendrá un apuntador al registro 0.

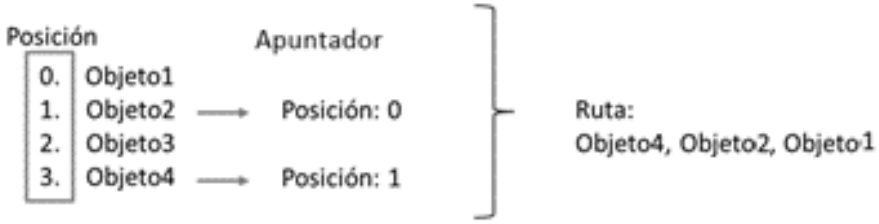


Figura 5-12 Ejemplo de estructura de datos (lista ligada)

El resultado del programa entrega el Conjunto Pareto Optimal en una lista dependiendo de las rutas encontradas con 'k' transferencias. En el esquema de la Figura 5-13 se ejemplifica la obtención un conjunto atractivo para hasta dos transferencias modales.

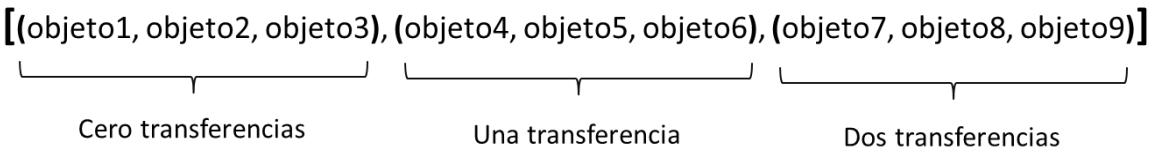


Figura 5-13 Ejemplo de estructura de lista con 2 transferencias modales

Despliegue de hiper-ruta mediante ArcGIS

Una vez ejecutado el programa**,** se genera una lista con los identificadores (*id*) de los arcos que forman el Conjunto Pareto Optimal correspondiente a un par origen – destino, entrega la ruta y el tiempo calculado estimado.

Para poder representar los resultados gráficamente, se copian los *id* y con ayuda del software ArcGIS, se carga el archivo de la red de análisis, se abre la tabla de atributos (Figura 5-14) y se crea una "selección por atributos" y mediante la instrucción *"FID" in ( )*, se realiza una selección de los arcos correspondientes a hiper-ruta obtenida. En la Figura 5-15 puede observarse de lado izquierdo el menú para realizar la selección por atributos y de lado derecho se puede observar la tabla de atributos de la red con la selección realizada.

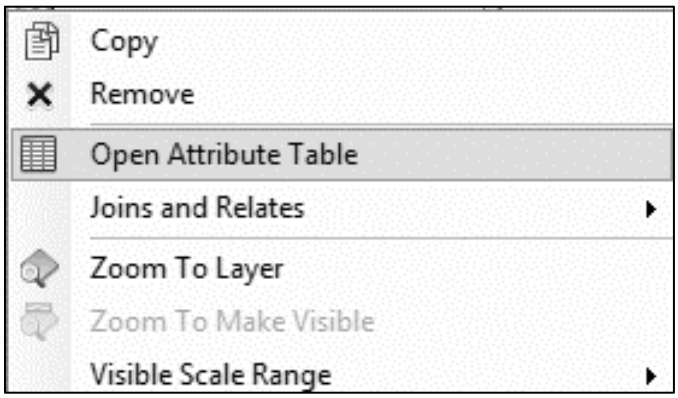


Figura 5-14 Menú contextual de la capa en ArcMap

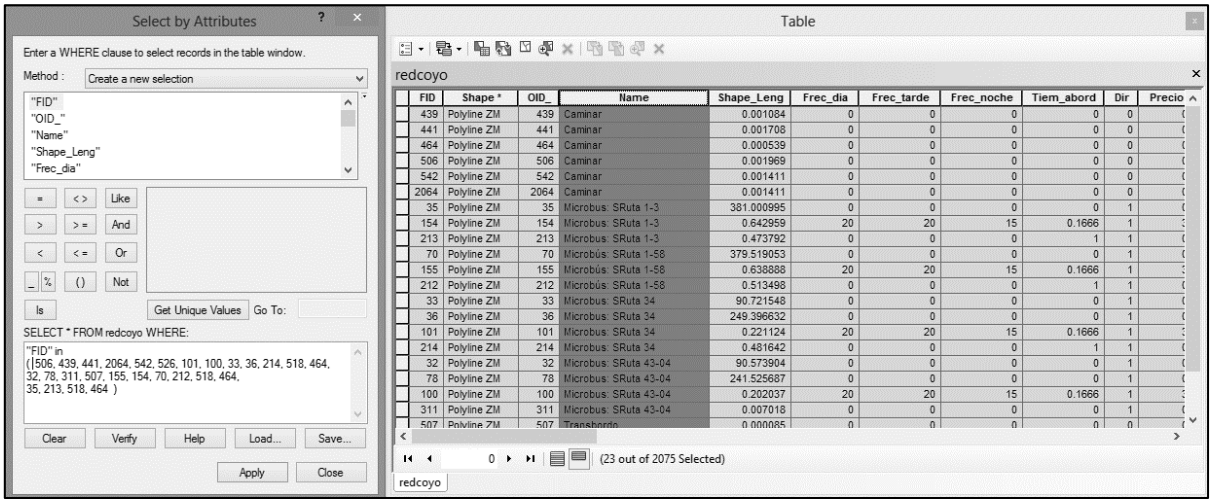


Figura 5-15 Ejemplo selección por atributos de ruta encontrada

El algoritmo programado "Shortest Viable Hiperpath in Multimodal Networks" que se puede encontrar en los anexos A, anexos B y anexos C, funciona adecuadamente entregando hiper-rutas más cortas que hacen uso de los múltiples modos de transporte que tiene la red dependiendo del número de transferencias modales, incluye el modo auto para obtener rutas multimodales que

cumplen con el diagrama de estados planteado. En el capítulo 6 se presentan soluciones de hiper-rutas más cortas en la red de estudio actual y con propuesta de transporte sustentable.

6. PROPUESTA DE TRANSPORTE SUSTENTABLE Y SISTEMA DE INFORMACIÓN AL VIAJERO

Este capítulo está integrado por tres puntos principales, en las cuales se aborda el transporte sustentable y la aplicación de sistemas inteligentes de transporte para la integración de los diferentes modos de transporte existentes en la zona de estudio. También se explica cómo puede funcionar el Sistema Avanzado de Información al Viajero (SAIV) en la red de estudio actual, y un escenario si se aplicaran los elementos de la propuesta de transporte sustentable, que incluye calles peatonales, circuito de mini autobuses eléctricos y sistema de gestión de estacionamientos.

6.1 Acciones de transporte sustentable factibles para el Centro de Coyoacán

El Reporte Brundtland (1987), define al desarrollo sustentable o sustentabilidad como *"Desarrollo que satisface las necesidades de la gente sin comprometer las actuales o futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades".*

En esta definición se reconocen aspectos ambientales y sociales que se integran al desarrollo económico para satisfacer las necesidades básicas de las diferentes clases sociales. Esto conlleva a buscar nuevas formas de integrar el uso de suelo y el desarrollo mediante sustentabilidad.

Para poder planear ciudades sustentables, en el ámbito del transporte es necesario, entre otras cuestiones, desarrollar fuentes de energía renovable y hacer un mejor uso del sistema de transporte público y privado, lo cual puede ayudar a reducir la huella ecológica.

El centro de Coyoacán tiene gran importancia cultural y social donde se genera una huella ecológica por el uso intensivo del transporte público y transporte privado sobre las vialidades secundarias, que provoca congestionamiento vial. Esto se genera mayormente en días festivos y fines de semana, días en que hay más visitantes que se congregan para pasear o pasar el tiempo en esta zona.

Los peatones se ven afectados ya que las banquetas no son lo suficientemente amplias, lo que causa aglutinamientos y provoca que muchas personas prefieran o se vean obligados a caminar sobre los carriles de circulación vehicular arriesgando su seguridad.

Además de esto, el transporte público concesionado no está correctamente regulado, lo que crea conflictos en puntos específicos. Algunos de los principales problemas son la asignación de bases

de microbuses improvisadas en zonas que no son adecuadas para ello, los vehículos realizan paradas continuas sin orillarse para recoger o bajar pasaje, la operación de los vehículos tienen frecuencias de paso irregulares y los usuarios no tienen información acerca de los horarios ni rutas disponibles. Estas acciones provocan que las personas no puedan planear sus viajes y a su vez exista una saturación de las rutas principales, ya que el viajero no puede seleccionar entre distintas alternativas porque no cuenta con información suficiente de los servicios de los que puede disponer.

Para hacer un mejor uso de los espacios públicos, se deben gestionar eficientemente los estacionamientos disponibles en la zona y contar con el soporte de las nuevas tecnologías.

En el Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo (ITDP, 2012), se menciona que la construcción y ampliación de carreteras genera un mayor volumen de automovilistas, los que anteriormente eran renuentes a hacer uso de estas vialidades ahora utilizan la nueva infraestructura, generando así, más tráfico vehicular que paulatinamente generará congestión vehicular. Este hecho implica que debe evitarse la generación de nueva infraestructura en zonas ya urbanizadas para solucionar problemas de congestión vehicular.

De acuerdo al tipo de transporte que hay en Coyoacán que se describe en el punto 1.4 del capítulo uno y a la descripción de la problemática en el centro de Coyoacán que se presentó en el capítulo cuatro, se llegó a la conclusión de que es indispensable la restricción vehicular en vialidades del centro histórico de Coyoacán durante días festivos, por las siguientes razones:

- Se observa saturación de peatones sobre las banquetas de calles que convergen al centro histórico
- Existe una gran afluencia de visitantes a la zona durante días festivos, y la mayor parte se concentra en las vialidades que rodean la plaza Hidalgo.
- Los vehículos de transporte público generan conflicto frente a la plaza Hidalgo, donde recogen pasaje, interfiriendo el paso de otros vehículos sobre la vialidad y generando congestión vehicular.
- Se observa una red desarticulada, ya que los modos de transporte no funcionan de manera integral.
- No existe información que puedan consultar los viajeros acerca de la ubicación de estacionamientos, o rutas de transporte público disponible.

Para abordar esta problemática se plantean acciones que los pueden mitigar como son:

- Asignar calles para uso exclusivo de peatones.
- Buscar dar la función de movilidad primordial al peatón, por lo que, retomando el caso de Roma, Italia, descrito en el punto 1.2.6 del capítulo uno; se propone un sistema de buses eléctricos los cuales tengan un circuito especifico que conecte con las principales rutas de transporte público, estacionamientos y puntos de interés para que el usuario no necesite moverse en vehículo privado y tenga alternativas de movilidad y actividades, facilitando la

movilidad en transporte público; esperando que esto provoque hacer menos atractivo el uso del automóvil en la zona céntrica de Coyoacán.

- Como herramienta de información para integrar el trasporte público, se propone la implementación de un sistema SAIV, aplicando el algoritmo que se desarrolló en el capítulo cinco, el cual es capaz de calcular rutas viables multimodales que en pruebas realizadas ya ofrece rutas que sean viables que se describen en el capítulo cinco. Con este programa el viajero podrá tener información adecuada para la toma de decisiones al planear sus rutas.

En resumen, las acciones propuestas para el transporte sustentable en la zona de estudio son:

- Desarrollo de corredores peatonales en las zonas importantes de congregación social y de esparcimiento, para dar prioridad al peatón en el centro histórico de Coyoacán durante fines de semana y días festivos.

  Se obtendrá un beneficio en la actividad económica de tiendas y restaurantes aledaños por el fácil acceso que tendrán los peatones al desplazarse, la imagen urbana puede mejorar considerablemente como ya se ha probado en diferentes ciudades de gran valor histórico (ver capítulo 1) y así la movilidad de la zona también se verá beneficiada.

  Se propone que algunas calles sean cerradas para vehículos y otras tengan acceso restringido; los residentes deberán contar con pases de acceso para ingresar a fin de no alterar sus actividades cotidianas.

  Las vialidades que se propone para que sean solamente peatonales son:
  - ✓ Calle Carrillo Puerto desde Francisco Ortega hasta Cuauhtémoc (Figura 6-2).
  - ✓ Cuauhtémoc, desde Aguayo hasta Ignacio Allende.

  Las calles mencionadas cuentan con un gran flujo de peatones y vehículos, por lo que el uso de calles peatonales evitará aglutinamientos ofreciendo beneficios de movilidad al peatón. Estas calles deben de tener señalización que indique que la vía está restringida a vehículos en un horario de 13Hrs a 22 Hrs. El servicio de carga para mercancías queda limitado al horario matutino de 10 a 13 Hrs, como se muestra en la Figura 6-1.

  La propuesta de la red vial del Centro del centro de Coyoacán, una vez una vez digitalizada, queda como se muestra en la Figura 6-3 y la Figura 6-4.

Figura 6-1 Señalización vertical

Figura 6-2 Calles peatonales propuestas

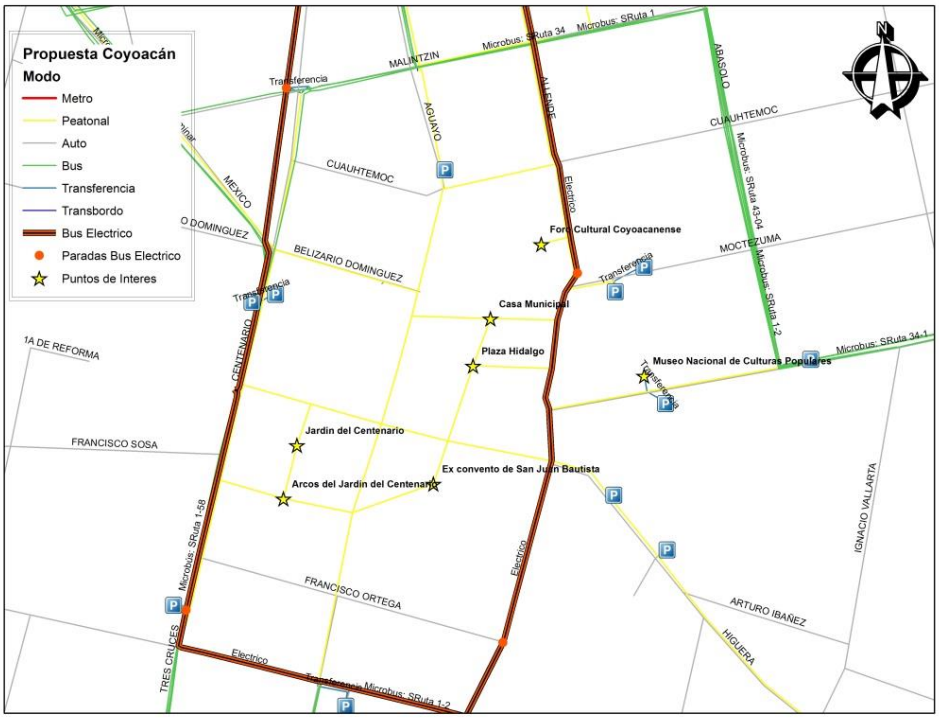


Figura 6-3 Red de la zona peatonal propuesta en el centro histórico de Coyoacán

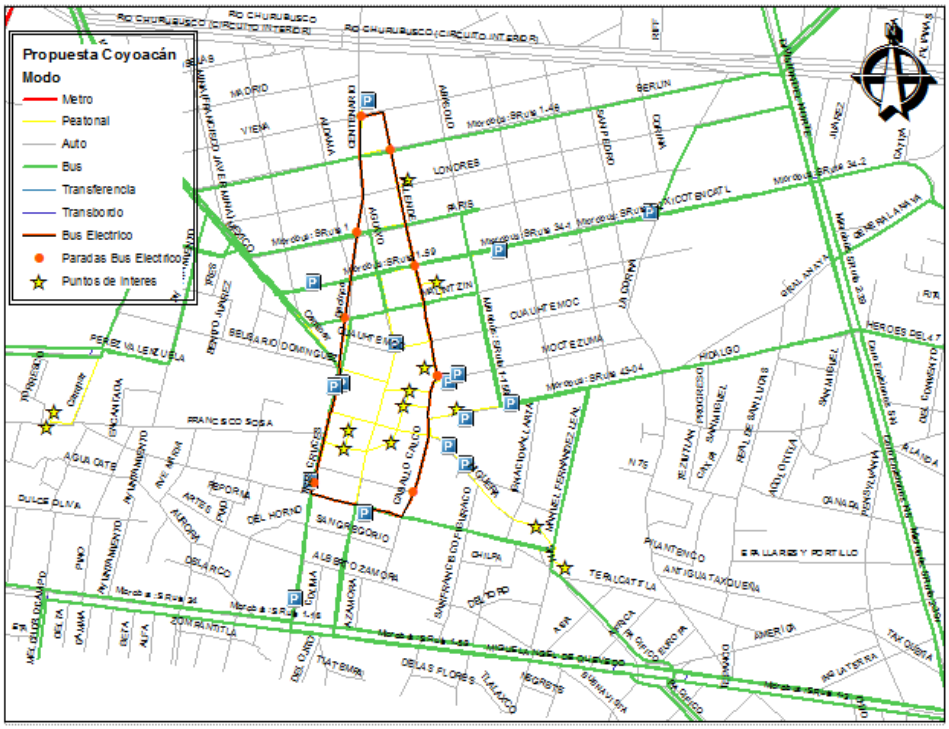


Figura 6-4 Circuito de mini autobuses eléctricos en la red de la propuesta de Coyoacán.

Calles con acceso restringido

Las calles Belisario Domínguez desde Centenario hasta Felipe Carrillo Puerto, Av. Miguel Hidalgo desde Abasolo hasta Caballo Calco y Moctezuma desde Abasolo hasta Ignacio Allende, se proponen como calles de doble sentido con acceso restringido mediante bolardos automáticos eléctricos (Figura 6-5), solo para acceso hacia los estacionamientos y a los residentes.

En las intersecciones entre Av. Miguel Hidalgo y Abasolo, Abasolo y Moctezuma, Belisario Domínguez y Centenario, deben contar con paneles de leyenda variable que muestren la disponibilidad de estacionamientos.

Figura 6-5 Bolardos automáticos eléctricos

- La ruta de los microbuses se propone sea reasignada durante días festivos para no hacer uso de las calles restringidas, por lo que para los vehículos de transporte público que utilizan la calle Felipe Carrillo Puerto dirección norte, se plantea se desvíen en Venustiano Carranza, pasando por el parque “La Conchita”, siguiendo por Fernando Leal hasta intersectar con la avenida Miguel Hidalgo, seguir por Abasolo y finalmente utilizar la calle Malintzin para reincorporarse en su ruta original.

- La recuperación de espacios públicos subutilizados es importante para la asignación de estacionamientos en la periferia o paradas oficiales para autobuses. En la Figura 6-6 se muestra un espacio en el cual se propone la reutilización del auto lavado, ex gasolinera, que está en la intersección entre Av. Miguel Hidalgo y la calle Fernández Leal, para evitar saturación de microbuses sobre la superficie de arrollamiento sobre la calle Miguel Hidalgo generado por el desvió de rutas de microbuses que pasaban por la calle Felipe Carrillo Puerto.

Figura 6-6 Posible espacio recuperable para parada de microbuses

- Identificación de los estacionamientos. La integración de los estacionamientos mediante Sistemas Avanzados de Gestión de Estacionamientos (SAGE) permiten una administración adecuada, ofreciendo la ventaja de que los viajeros automovilistas tengan la información necesaria sobre la ubicación de estacionamientos, aunado al SAIV podrán realizar viajes multimodales con una certidumbre del transporte que utilizaran.

  Una de las características del SAGE es que se puede brindar información mediante el despliegue en paneles dinámicos sobre ubicación y disponibilidad de estacionamientos. La Figura 6-7 ejemplifica puntos estratégicos donde pueden ser colocados los paneles de información dinámica en la zona de estudio, la ubicación de los paneles cubre las vialidades de acceso principales al centro de Coyoacán.

  Las tarifas de los estacionamientos necesitan ser controladas para brindar un costo competitivo que sea atractivo a los automovilistas.

Figura 6-7 Propuesta de tableros dinámicos para estacionamientos.

- El transporte de carga y mercancías que surte a los negocios y traslado de valores no podrá operar en las calles peatonales durante días festivos en un horario restringido entre las 13:00 horas y las 21:00 horas.

- Se propone un Sistema Inteligente de Transporte SIT, en particular un Sistema Avanzado de Información al Viajero SAIV descritos en el capítulo 2. El SAIV es una herramienta que facilitará el uso de la red de transporte en el centro de Coyoacán, haciendo un mejor uso del transporte privado y ofreciendo una mejora en la experiencia de usar el transporte público para el usuario.

  El SAIV debe de ofrecer:

  - ✓ Rutas viables multimodales y tiempos de recorrido.
  - ✓ Información de frecuencias de paso del transporte público.
  - ✓ Ubicación de los estacionamientos.
  - ✓ Ubicación de los sitios de interés.
  - ✓ Información de calles cerradas para vehículos.

  El sistema SAIV puede implementarse sin tener que realizar modificaciones al espacio urbano.

- Implementación de mini autobuses eléctricos (Figura 6-8) que circulen dentro de la zona restringida, que conecte con las distintas líneas de microbús, con los estacionamientos,

puntos de transbordo importantes y sitios de interés. Este tipo de vehículos tienen la ventaja de no emitir gases nocivos, cuentan con una autonomía suficiente para cubrir un circuito dentro de la zona del centro de Coyoacán.

Figura 6-8 Mini autobús eléctrico

Se presentan las especificaciones técnicas mínimas del autobús eléctrico de la Figura 6-8 que es el vehículo utilizado en la red de camiones eléctricos de la ciudad de Roma (atac, 2013) el cual se presenta como ejemplo

- Longitud Max : 5,1m
- Ancho Max: 2,3 m
- Capacidad Max. Aprox.: 27 personas
- Autonomía: 45 km (6 horas aprox.)
- Cero contaminación en áreas urbanas

La Figura 6-9 muestra el circuito de los mini autobuses eléctricos y como está conectado con la red de transporte en el centro de Coyoacán.

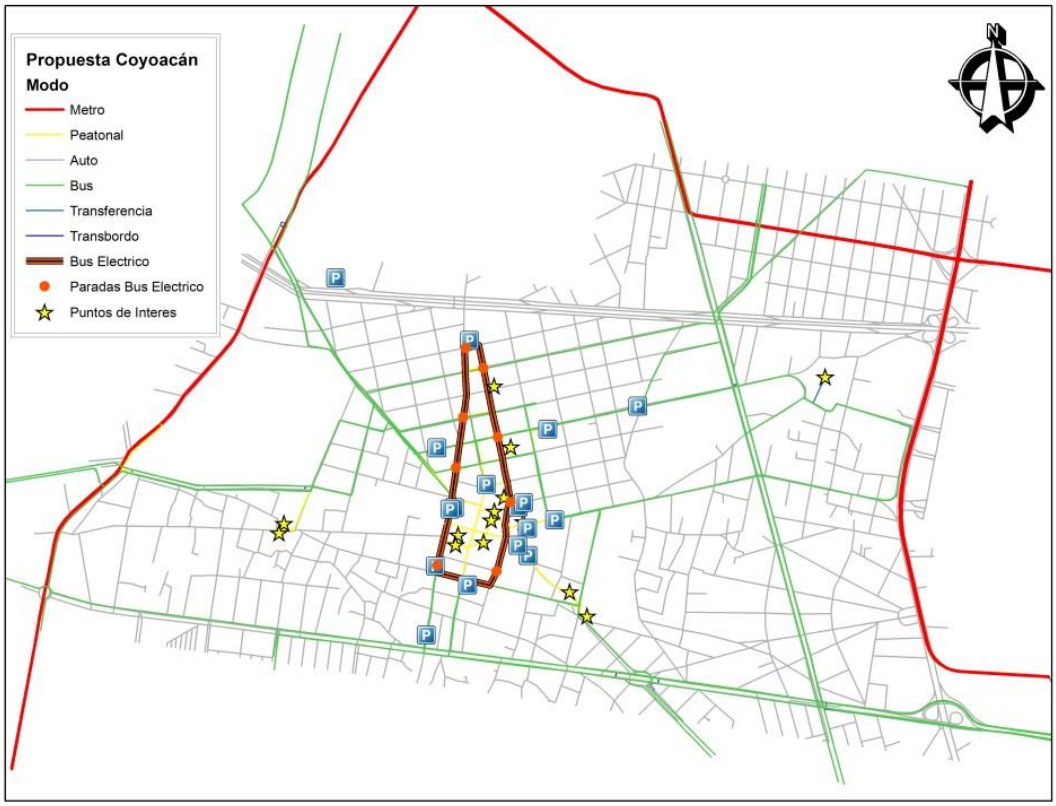


Figura 6-9 Propuesta de circuito de bus eléctrico

Esta serie de propuestas fomentará el uso eficiente del transporte público y privado así como el transporte alternativo (peatonal y bus eléctrico). Las emisiones de gases nocivos al ambiente como el CO2 y la huella ecológica será reducida y el usuario contará con información para tomar decisiones antes y durante sus trayectos.

La propuesta integra herramientas que ofrecen las tecnologías de la información aplicadas al transporte como son el SAIV y el SAGE además de la implementación de vialidades peatonales para realizar mejoras en el transporte urbano dentro del centro histórico de Coyoacán con tal de ofrecer una mayor prioridad al peatón.

6.2 Sistema de Información al Viajero para la situación actual en el Centro de Coyoacán

La red de estudio incluye los modos de transporte público y privado predominantes en la zona centro de Coyoacán en el tiempo en el que se elaboró la presente tesis, es así que se trabajó en la conexión entre los distintos modos de transporte existentes para lograr una red multimodal de transporte urbano que se muestra en la Figura 6-10 para que pueda funcionar el SAIV que es capaz de calcular rutas viables que integren y hagan un mejor uso de las diferentes opciones de movilidad que se ofrecen.

Una de las características de este modelo es que los estacionamientos en vía pública no están considerados debido a que no son lugares designados para tal uso y en la actualidad no existe manera de tener un registro de plazas ocupadas por vehículos en la vía pública; sólo se ubicaron y georreferenciaron los estacionamientos públicos de particulares que existen en la zona. También se han identificado los sitios de interés principal que son focos de atracción turística y se han conectado a la red mediante arcos peatonales de tal manera que puedan calcularse rutas que involucren los diferentes modos posibles ya que existen interacciones entre los diferentes modos de transporte.

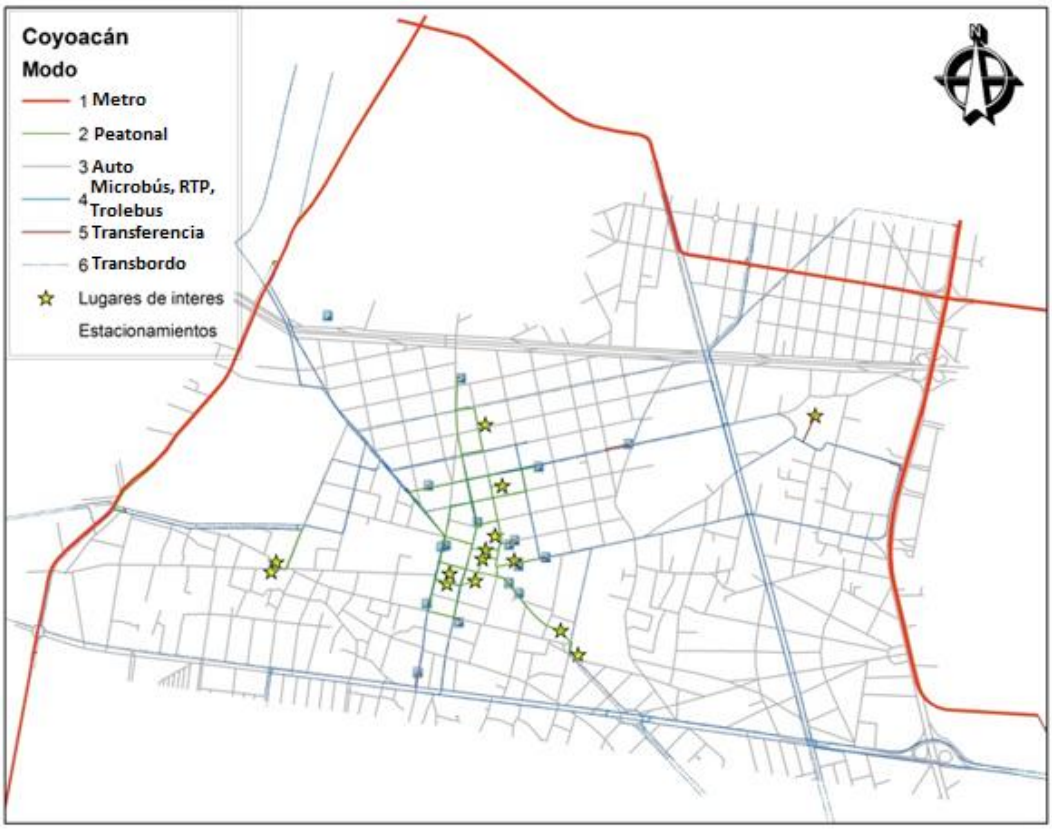


Figura 6-10 Red Multimodal actual en el centro histórico de Coyoacán

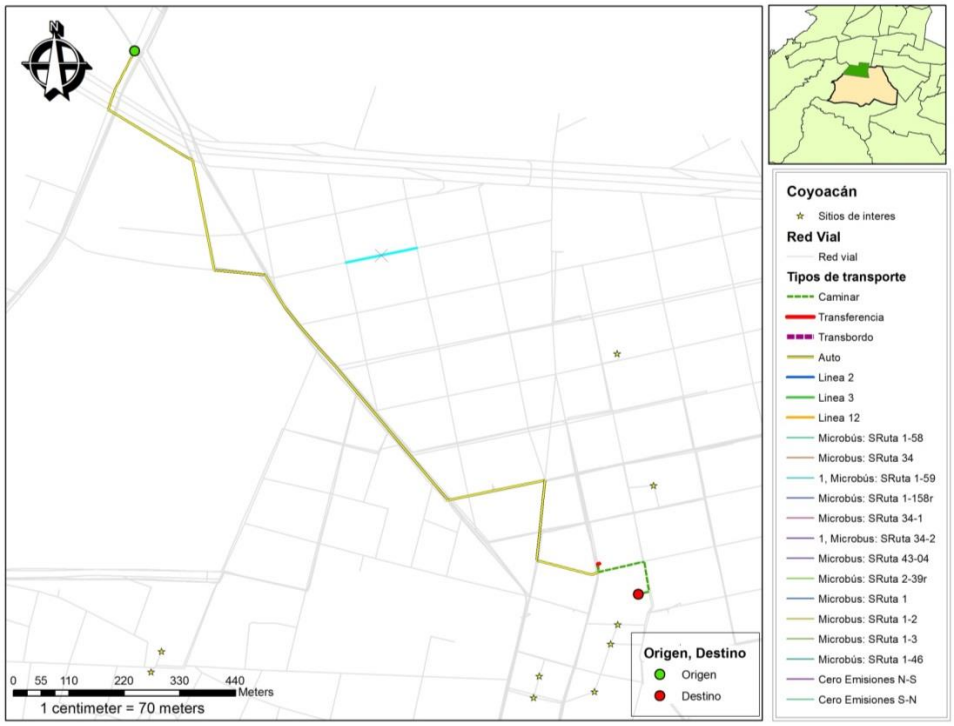
Una vez funcionando el programa del algoritmo “Shortest Viable Hyperpath in multimodal Networks” en la red descrita, para ejemplificar su funcionamiento se presentan los siguientes casos. Cabe aclarar que en la red del área de estudio solo se encontraron cálculos de rutas con hasta tres transferencias modales.

Caso 1

Ruta con una transferencia modal.

La Figura 6-11 muestra un recorrido iniciado en automóvil desde la zona noroeste del área de estudio, entrando por Av. Universidad con destino en el centro histórico de Coyoacán.

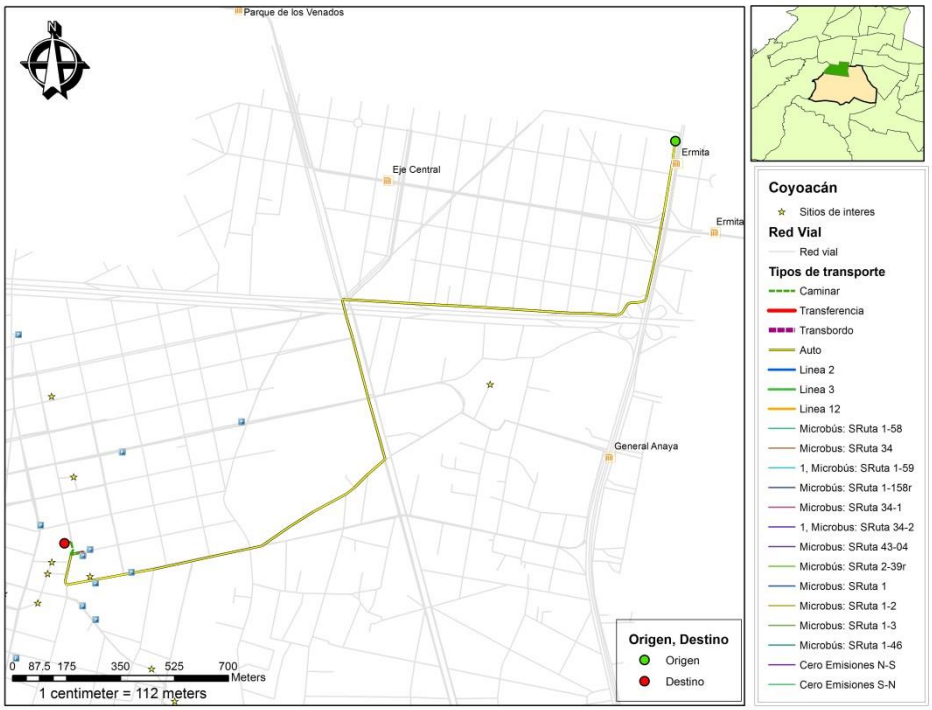
La ruta cuenta con un tiempo estimado de 6.1 minutos. Inicia el trayecto en modo auto hasta llegar a un estacionamiento en esquina con calle Aguayo y Cuauhtémoc; se deja el auto, realiza una transferencia al modo peatonal para llegar al destino a pie.



El tiempo con 1 transferencias es: 6.108 minutos
El conjunto de rutas es:
Calles: UNIVERSIDAD, RIO CHURUBUSCO, JOSEFA ORTIZ DE DOMINGUEZ, MADRID, MEXICO, XICOTENCATL, CENTENARIO, CUAUHTEMOC, AGUAYO, Estacionamiento, Transferencia, Caminar

Figura 6-11 Ruta iniciada en auto desde la zona noroeste llegando por Av. Universidad al centro de Coyoacán

La Figura 6-12 muestra otro recorrido iniciado en automóvil desde la zona noreste del área de estudio, entrando por Calzada de Tlalpan con destino en el centro histórico de Coyoacán. La ruta cuenta con un tiempo estimado de 6.51 minutos. Inicia el trayecto en modo auto hasta llegar a un estacionamiento en la calle Moctezuma, se deja el auto y se hace una transferencia al modo peatonal para llegar al destino a pie como se muestra a detalle en la Figura 6-13.



El tiempo con 1 transferencias es: 6.51 minutos
El conjunto de rutas es:
Calles: TLALPAN, RIO CHURUBUSCO, DIVISION DEL NORTE, GRAL ANAYA, HIDALGO, ABASOLO, ALLENDE, MOCTEZUMA, Estacionamiento, Transferencia, Caminar.

Figura 6-12 Ruta iniciada en auto desde la zona noreste llegando por Calzada de Tlalpan al centro de Coyoacán

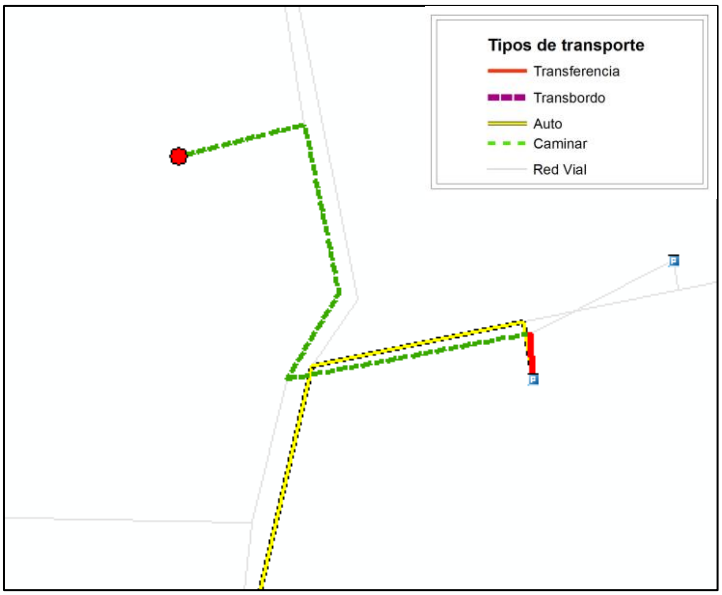


Figura 6-13 Detalle de transferencia modal entre modo auto y peatonal

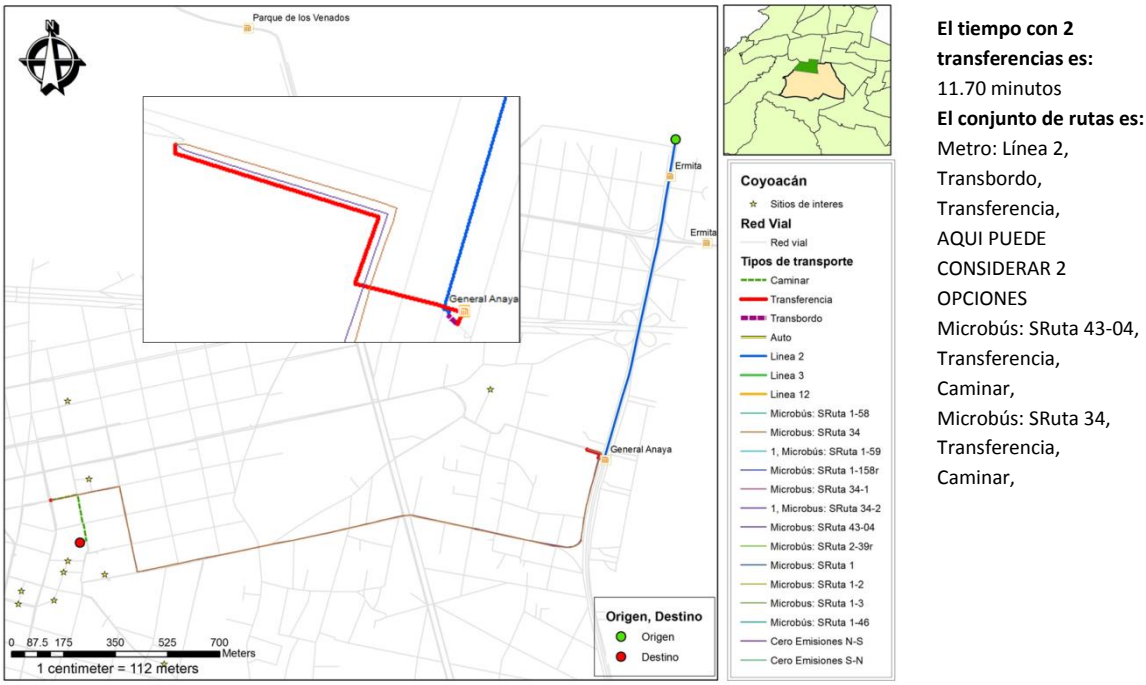
Puede observarse la diferencia entre la ruta de la Figura 6-12 y la ruta de la Figura 6-13, en estas dos rutas dependiendo del punto de origen para llegar al mismo destino es preferible usar otro estacionamiento el cual satisfaga un menor tiempo de traslado por la rapidez al utilizar el automóvil y caminar una distancia menor.

De estos dos y varios ejemplos más que se corrieron, al iniciar con modo automóvil la mejor ruta encontrada siempre es llegar hasta algún estacionamiento cercano al punto de destino, en este caso, al centro de Coyoacán y caminar una pequeña distancia, lo cual descarta el uso de otros modos de transporte público.

Caso 2

Rutas con dos transferencias modales.

La Figura 6-14 muestra una ruta iniciada en Metro desde la Línea 2 con destino en el centro histórico de Coyoacán. La ruta cuenta con un tiempo estimado de 11.7 minutos (en este ejemplo se plantea que un viajero ya está usando la línea del Metro y el tiempo no considera la espera que implica esperar el convoy). Inicia el trayecto en modo Metro hasta llegar a la estación General Anaya, baja del Metro y realiza una transferencia al llegar al modo microbús donde tiene dos opciones, una es tomar la ruta 34 y otra es la ruta 43; en ambas opciones se llega a la misma parada, donde se hace otra transferencia modal al modo peatonal para llegar al destino a pie.

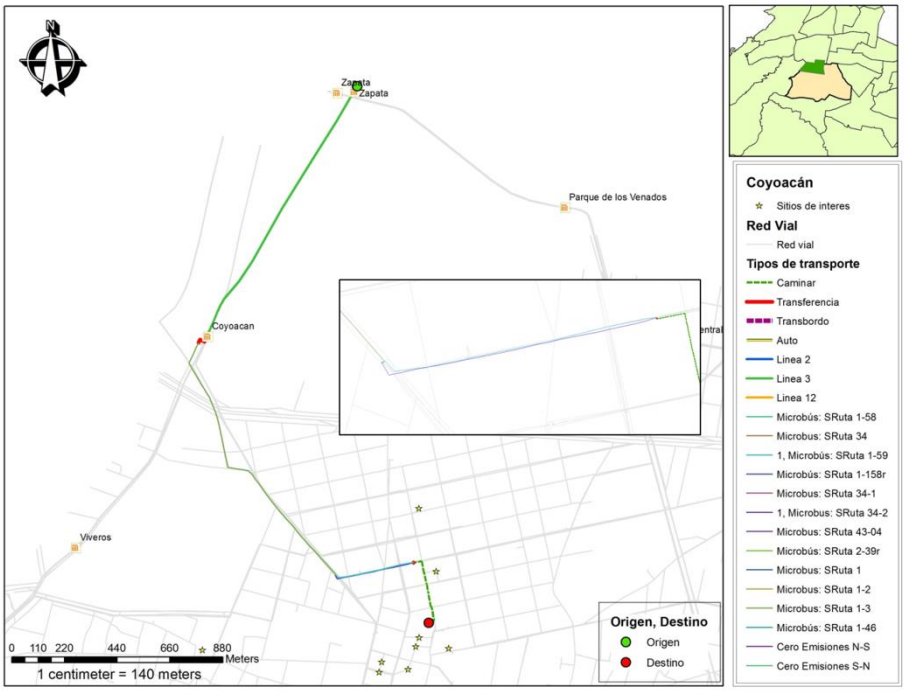


El tiempo con 2 transferencias es:
11.70 minutos
El conjunto de rutas es:
Metro: Línea 2,
Transbordo,
Transferencia,
AQUI PUEDE CONSIDERAR 2 OPCIONES
Microbús: SRuta 43-04,
Transferencia,
Caminar,
Microbús: SRuta 34,
Transferencia,
Caminar,

Figura 6-14 Ruta iniciada en Metro desde la zona noroeste llegando por Metro Línea 2 al centro de Coyoacán

La Figura 6-15 muestra otra ruta iniciada en Metro, ahora desde la Línea 3, con destino en el centro histórico de Coyoacán. La ruta cuenta con un tiempo estimado de 13.36 minutos (en este ejemplo se plantea que un viajero ya está usando la línea del Metro y el tiempo no considera la espera que implica esperar el convoy). Inicia el trayecto en modo Metro hasta llegar a la estación Coyoacán, baja del Metro y realiza una transferencia al llegar al modo microbús donde toma la ruta 1, avanza y llega a una parada; aquí tiene dos opciones, una es tomar la ruta 1-59 y otra es la

ruta 34; en ambas opciones se llega a la misma parada para hacer otra transferencia modal y terminar en modo peatonal para llegar al destino a pie.



El tiempo con 2 transferencias es: 13.36 minutos
El conjunto de rutas es: Metro: Línea 3, Transferencia, , Microbus: SRuta 1-3, *AQUI PUEDE CONSIDERAR **2** OPCIONES*

- Microbus: SRuta 1-59, Transferencia, Caminar,
- Microbus: SRuta 34-2, Transferencia, Caminar

Figura 6-15 Ruta iniciada en Metro desde la zona noreste llegando por Metro Línea 3 al centro de Coyoacán

Puede observarse que usando el transporte público pueden surgir más posibilidades para combinar los diferentes modos de transporte, dando la ventaja al usuario que ahora puede conocer las posibles de rutas que tiene para llegar a su destino, sin tener que limitarse. También queda claro que una vez usado el transporte público, no se puede utilizar el modo auto ya que se tiene la premisa en el diagrama de estados de que no se puede abordar un automóvil particular en cualquier punto de la ciudad después de haber abandonado el origen.

Caso 3

Rutas con hasta tres transferencias modales.

Se presenta el caso de iniciar un viaje desde el modo peatonal, en este caso se encontró un conjunto de rutas de hasta tres transferencias modales (Figura 6-16).

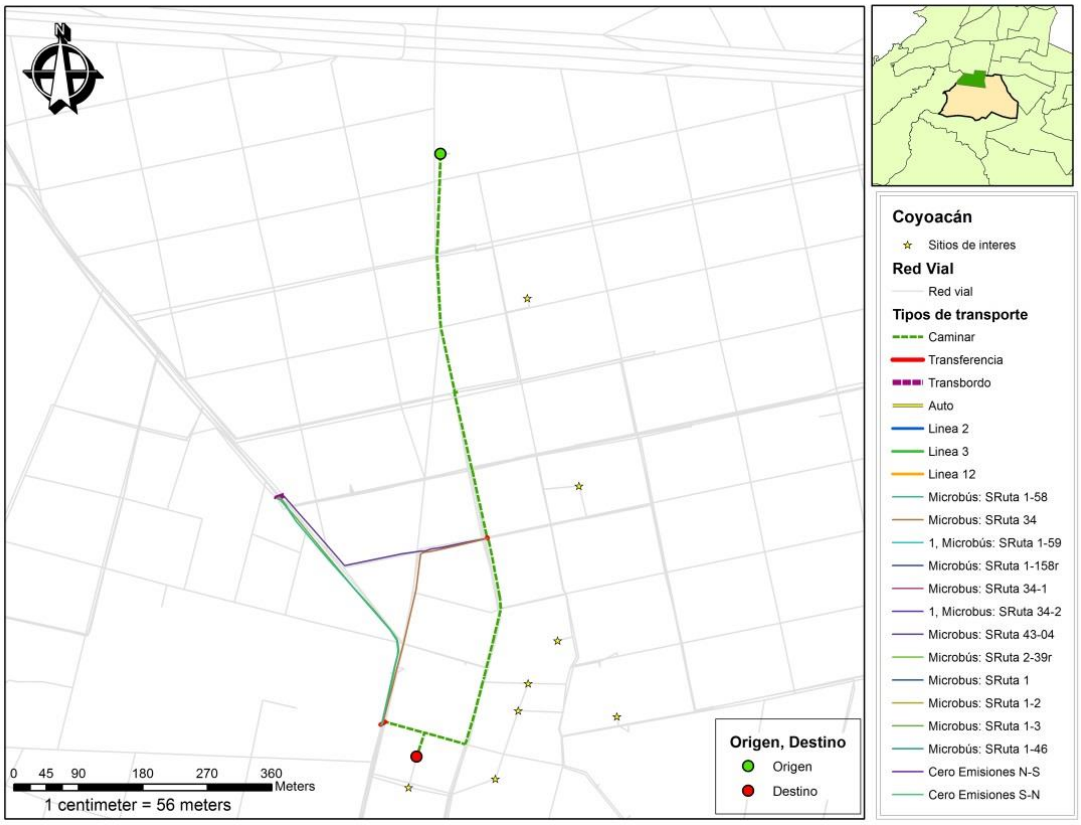
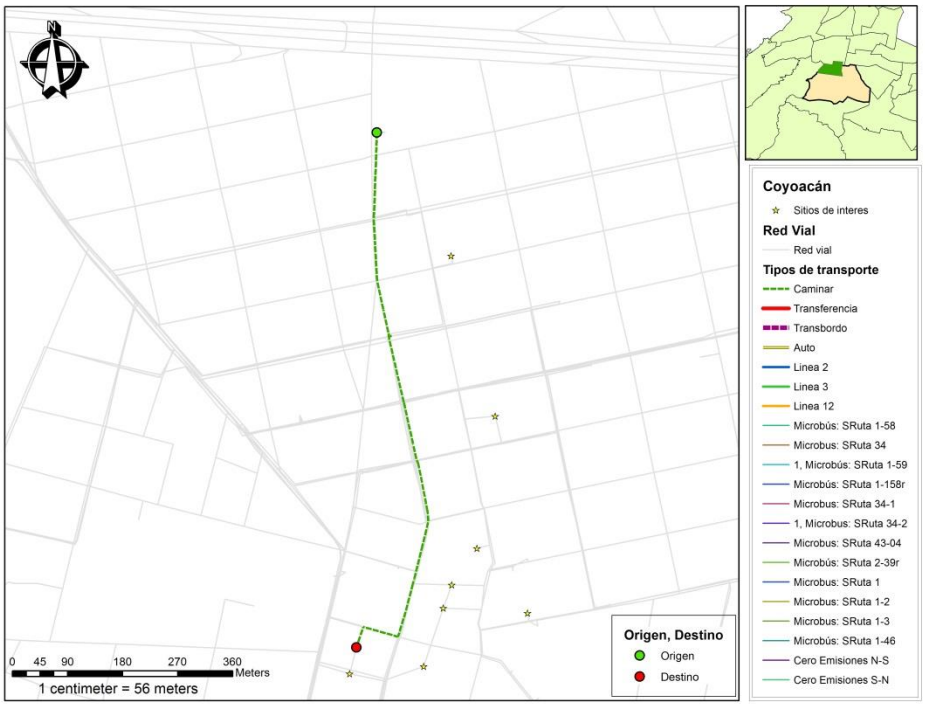


Figura 6-16 Conjunto de rutas hasta 3 transferencias modales

Para un mejor entendimiento de este conjunto de rutas (Conjunto Pareto Optimal) se describen las diferentes posibilidades que presenta esta configuración.

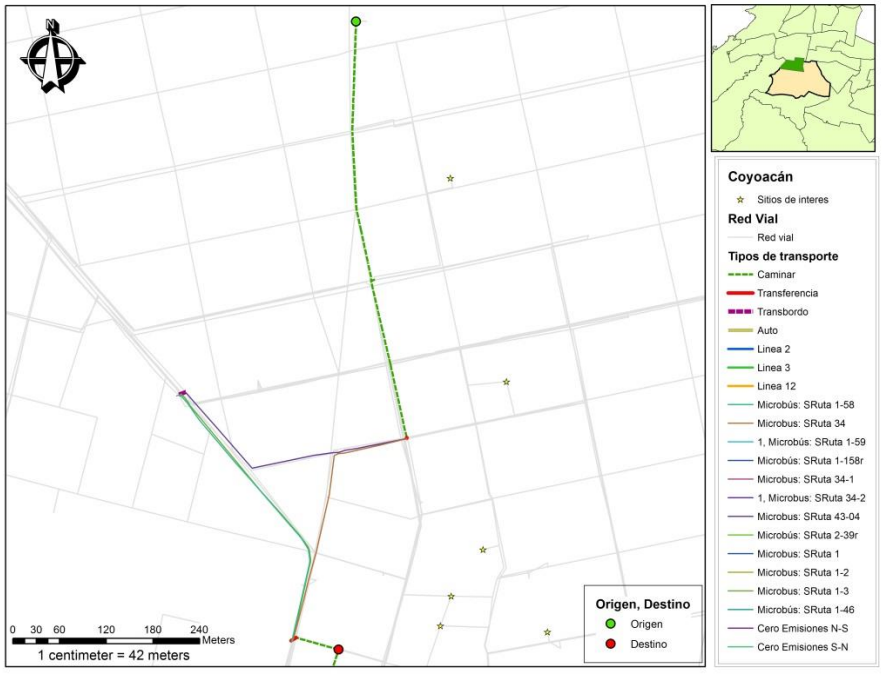
La Figura 6-17 muestra la ruta con cero transferencias modales que obtuvo un tiempo de 15.43 minutos y solo implica el modo peatonal.

La ruta de la Figura 6-18 mejora el tiempo llegando a 14.19 minutos, pero aumenta a dos transferencias modales; inicia caminando, al llegar a una parada (Figura 6-19), realiza un transbordo y tiene dos opciones de dos líneas de microbús: por la ruta 34 realiza una transferencia para llegar al destino en modo peatonal; y por la ruta 43 llega a otra parada donde tiene otras dos opciones, dos líneas de microbús; con ambas realiza una transferencia para llegar al destino en modo peatonal.



El tiempo con 0 transferencias es: 15.43 minutos
El conjunto de rutas es:
Caminar

Figura 6-17 Ruta iniciada caminando de la zona norte-centro al centro de Coyoacán



El tiempo con 3 transferencias es: 14.19 minutos
El conjunto de rutas es:
Caminar,
AQUÍ PUEDE CONSIDERAR 2 OPCIONES

- Microbús: SRuta 34, Transferencia, Caminar,
- Microbús: SRuta 43-04, Transbordo,
  AQUI PUEDE CONSIDERAR 2 OPCIONES
  - Microbús: SRuta 1-58, Transferencia, Caminar,
  - Microbús: SRuta 1-3, Transferencia, Caminar,

Figura 6-18 Hiper-ruta iniciada caminando de la zona norte-centro al centro de Coyoacán

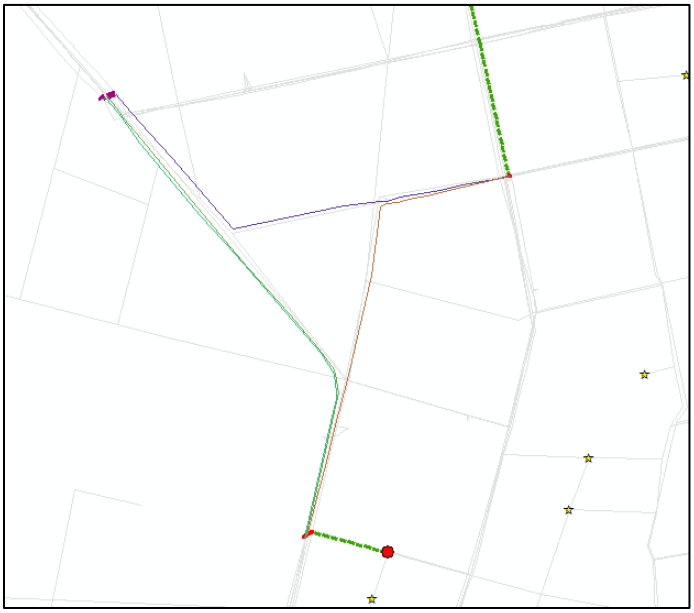


Figura 6-19 Detalle de hiper-ruta con tres transferencias modales

Puede parecer lógico que la primer ruta de dos transferencias que usa la línea de microbús ruta 34 sea más rápida, sin embargo el conjunto encontrado es la hiper-ruta en donde se involucran las probabilidades de que pase una línea u otra, lo que comprende el Conjunto Pareto Optimal, el cual cumple mejorando el tiempo de recorrido pero aumentando el número de transferencias. El usuario al final puede elegir que tiene mayor relevancia en un momento o circunstancias determinadas para la elección de la ruta.

El SAIV puede implementarse como una herramienta para el usuario e integrado con la gestión de estacionamientos (SAGE) permitirá ofrecer un servicio de información integral pudiendo ofrecer ubicación de estacionamientos y su capacidad, obtención de rutas y tiempos de recorrido, despliegue de mapas digitales de servidores de mapas web y líneas trasporte disponibles así como sus interconexiones.

Para una implementación futura de mapas web, se evaluó el uso de la herramienta “Open Layers”, que es un software libre y permite el despliegue imágenes satelitales o de calles de diferentes servidores de mapas como Google Maps, Bing Maps, Open Street Maps, entre otros. La herramienta Open Layers permite la superposición de capas e importación de archivos de extensión kml, y que puede ser combinado con herramientas como Geoserver, el cual permite administrar la base de datos de mapas vectoriales, y se puede lograr una adecuada presentación de las rutas que se obtengan (Figura 6-20). La Figura 6-21 muestra cómo pueden se pueden presentar las rutas sobre una imagen satelital.

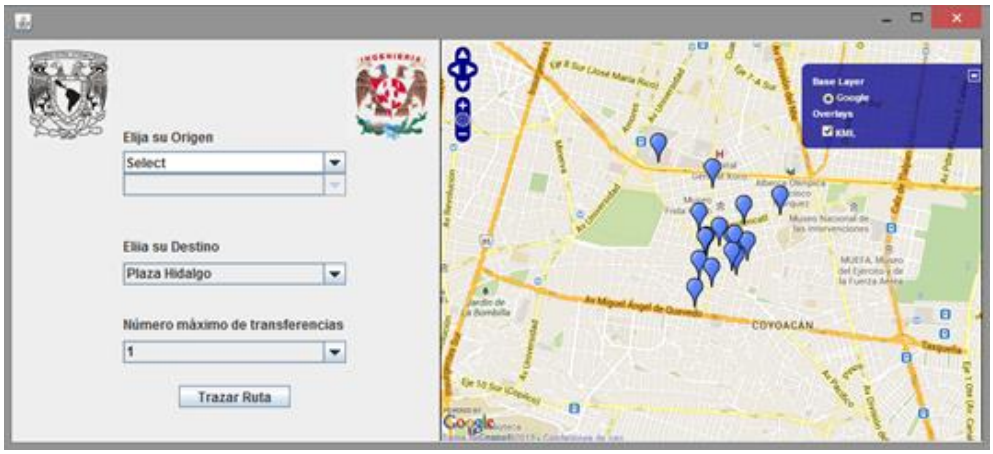


Figura 6-20 Ejemplo de interface de usuario para el cálculo de hiper-rutas multimodales mínimas con ubicación de estacionamientos en Coyoacán.

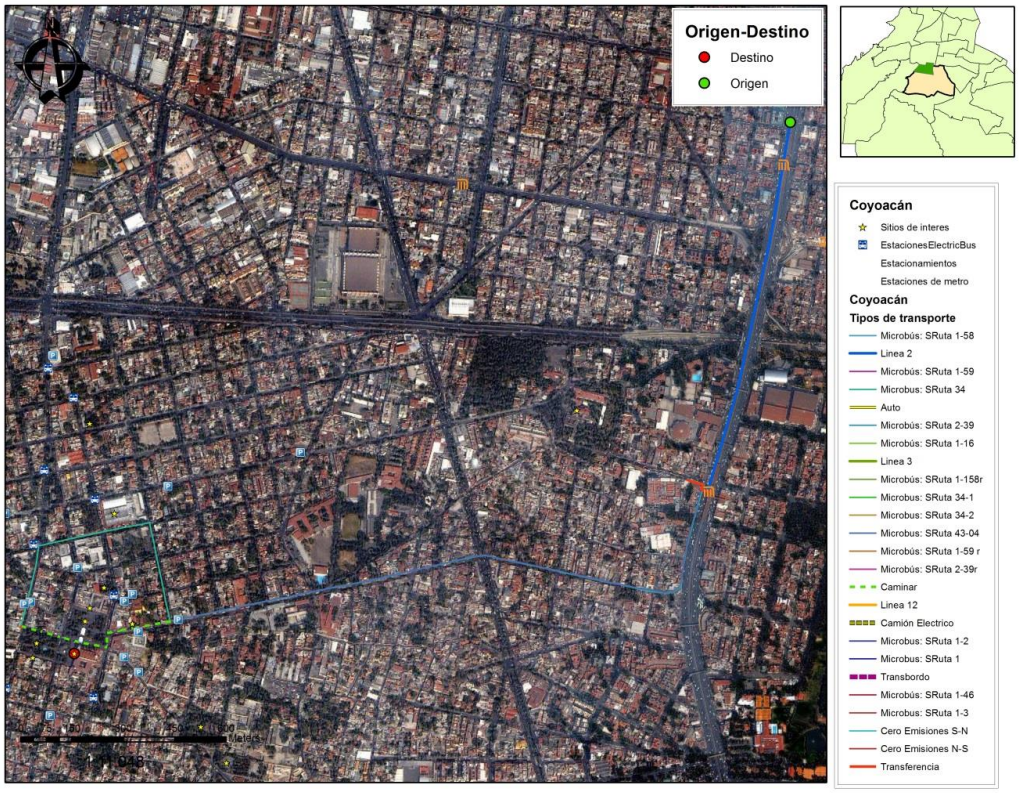


Figura 6-21 Ruta calculada sobre una imagen satelital

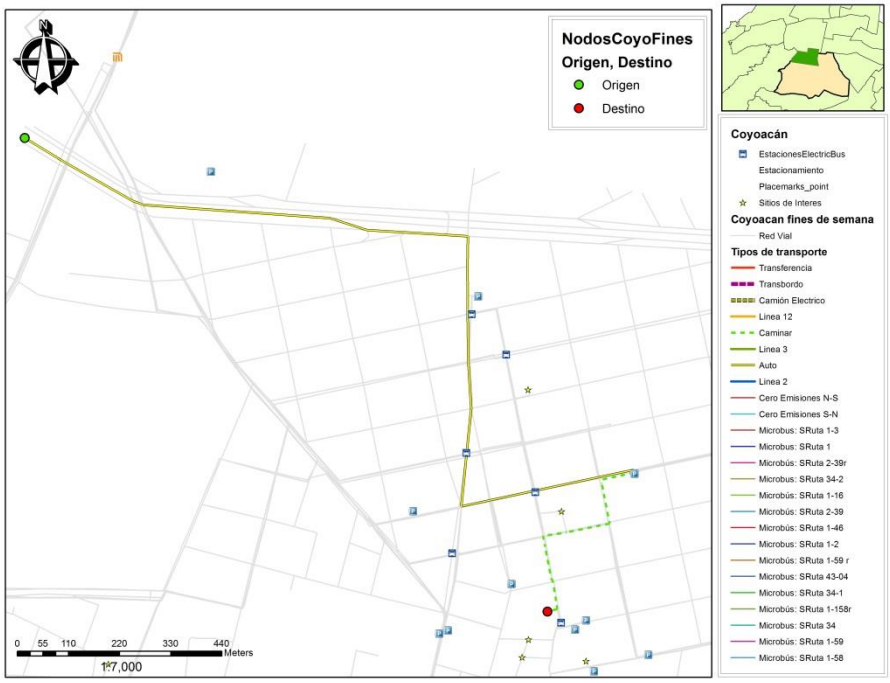
Para una implementación web del SAIV se necesitara una interfaz para el usuario, que sea intuitiva y fácil de usar; donde el usuario identifique visualmente y con un lenguaje común los elementos donde se puedan seleccionar origen, destino, número de transferencias deseadas y posiblemente filtrar qué modo de transporte no desea utilizar. El despliegue de mapas web, solo se describe como una línea de trabajo futuro; una vez integradas el SAIV y el SAGE, el viajero tendrá elementos suficientes para tomar decisiones y podrá hacer un mejor uso de la red multimodal;

por lo que el viajero podrá realizar recorridos eficientes, reduciendo tiempos de traslado, consumiendo menos combustible, podrá reducir estrés y congestión vial.

6.3 Sistema de Información al Viajero para la situación de transporte sustentable en el Centro de Coyoacán

En este punto se ejemplifica el funcionamiento del sistema SAIV, mediante la obtención de rutas en la red propuesta. Se muestra cómo sería la operación de la integración del sistema de trasporte con la propuesta de zonas peatonales y las rutas propuestas del transporte público eléctrico. En los ejemplos de ruta con auto se representa la situación de estacionamientos sin cupo en las calles inmediatas al centro histórico, esto fue realizado dando un costo (tiempo) alto a los arcos entrantes y salientes a los estacionamientos. Se plantea este escenario debido a que los fines de semana en caso de la propuesta, no estará permitido estacionarse en las calles cercanas y los estacionamientos pueden saturarse rápidamente.

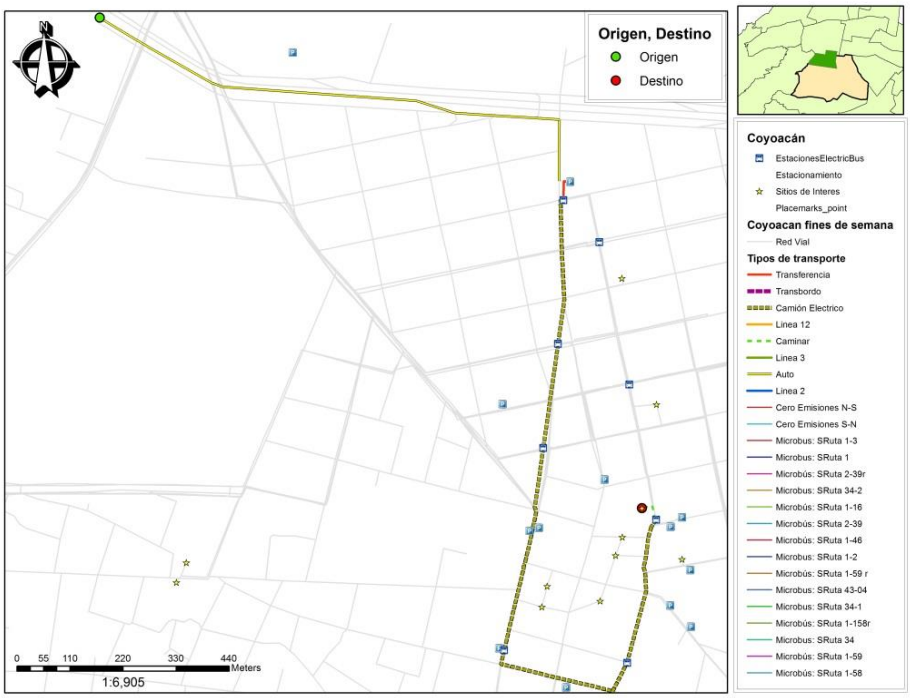
La Figura 6-22 muestra el ejemplo de un viaje iniciado en modo auto desde Río Churubusco para llegar al centro de Coyoacán. El mínimo número de transferencias necesarias para llegar es una. Se llega en modo auto a un estacionamiento sobre la calle Xicoténcatl y a partir de ahí se llega caminando al destino haciendo uso en la última parte de las tres vialidades peatonales propuestas.



El tiempo con 2 transferencias es:
14.19 minutos
El conjunto de rutas es:
RIO CHURUBUSCO,
CENTENARIO,
XICOTENCATL,
Estacionamento,
Transferência,
Caminar

Figura 6-22 Ruta iniciada en auto desde la zona noroeste llegando por Rio Churubusco al centro de Coyoacán (una transferencia modal)

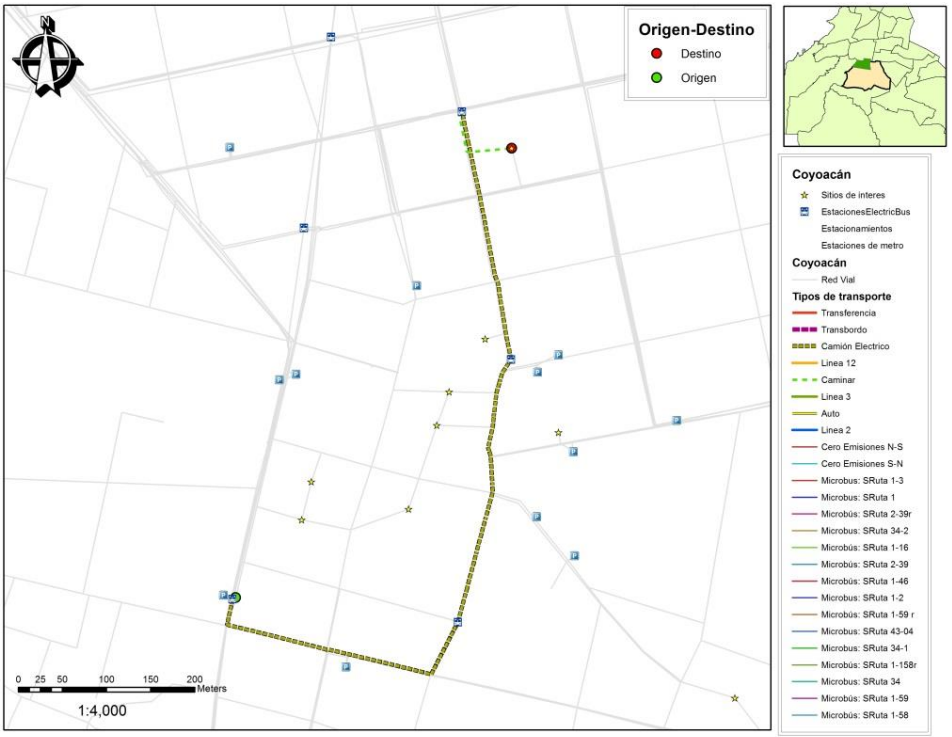
En otro ejemplo se encontró otra ruta con dos transferencias modales con un menor tiempo de traslado (Figura 6-23), utiliza el modo automóvil, mediante un estacionamiento cercano a Río Churubusco, es permitido realizar una transferencia modal a partir del modo automóvil al circuito de Mini Autobús Eléctrico el cual tiene permitido pasar por el centro de Coyoacán y finaliza haciendo uso en modo peatonal. Se puede apreciar que esta ruta hace buen uso del bus eléctrico, el cual permite dejar el auto a una distancia considerable y solo caminar unos cuantos metros.



El tiempo con 2 transferencias es: 9.23 minutos
El conjunto de rutas es: Calles: RIO CHURUBUSCO, CENTENARIO, Estacionamiento, Transferencia, Eléctrico, Transferencia, Caminar,

Figura 6-23 Ruta iniciada en auto desde la zona noroeste llegando por Av. Universidad al centro de Coyoacán (dos transferencias modales)

En el ejemplo de la Figura 6-24, puede observarse una ruta que hace uso del Mini Autobús Eléctrico, maneja dos transferencias modales; inicia caminando, aborda el Mini Autobús Eléctrico y termina caminando hacia el mercado. El tiempo de recorrido con dos transferencias usando el Mini Autobús Eléctrico es de 11.53 minutos, a diferencia de una ruta solamente de modo peatonal de 13.3 minutos.



El tiempo con 2 transferencias es: 11.53 minutos
El conjunto de rutas es: Caminar, Transferencia, Bus Eléctrico, Transferencia, Caminar

Figura 6-24 Ruta iniciada en auto desde la zona noroeste llegando por Av. Universidad al centro de Coyoacán (dos transferencias modales)

En la red propuesta de calles peatonales, el algoritmo funciona apropiadamente entregando resultados coherentes y viables en los ejemplos que se ejecutaron.

Las rutas han sido calculadas tratando de representar estacionamientos sin capacidad para almacenar más vehículos, considerando que existe el sistema SAGE que pueda brindar esta información al SAIV, a diferencia de las rutas calculadas en el escenario de operación actual (punto 6.2), se puede encontrar contrastes como tiempos de recorrido menores en el caso de utilizar estacionamientos lejanos, así como una mayor versatilidad en el uso del transporte público.

Finalmente operando un servicio de SAIV el viajero podrá disponer de estimaciones de tiempo más acertadas, a diferencia de los modelos de obtención de rutas que existen en la actualidad, ya que no consideran frecuencias de paso en el transporte público, que es la información con la que se podría contar a falta de una operación bien monitoreada del transporte público en México. El SAIV cuenta con las rutas de microbús que transitan por la Delegación Coyoacán, es capaz de realizar rutas multimodales, integración con estacionamientos y recorridos peatonales.

Además, aplicando las diferentes herramientas que existen en los SIT puede gestionarse de mejor manera la movilidad porque, tanto el automovilista como el usuario de transporte público cuentan con información y certeza del tiempo aproximado de llegada a su destino haciendo que haya un mejor uso de los distintos modos de transporte, posibilitando un mayor atractivo del transporte público y menos el uso del automóvil.

CONCLUSIONES

El transporte público de pasajeros en Coyoacán es flexible, versátil y amplio, sin embargo ofrece un mal servicio en conjunto, ya que cada modo de transporte es operado por diferentes actores y falta organización entre ellos. El objetivo del transporte público debería ser lograr un sistema integral que evolucione mediante una buena administración e implementación de tecnologías en un sistema regulado del que existan servicios de información y obtención de rutas para que los usuarios puedan tomar decisiones al planear sus viajes.

En esta tesis se da énfasis a la importancia de los Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT), que pueden servir como una herramienta de información de soporte del transporte, en las ciudades de México, donde día a día se generan conflictos por obtener un espacio en la vialidad o bien se busca aminorar el tiempo de traslado entre orígenes y destinos.

Para hacer un mejor uso de la red de transporte público de pasajeros y que los viajeros tengan fuentes de información para planear sus viajes se implementó el algoritmo de obtención de Hiper-Rutas Viables Mínimas como un Sistema Avanzado de Información al Viajero (SAIV), esta herramienta es un elemento importante de la propuesta de transporte sustentable de esta tesis. El SAIV también podrá brindar a los viajeros información de rutas que utilizan microbuses o rutas multimodales poco conocidas que pueden ser mejores alternativas para trasladarse.

La implementación del algoritmo de obtención de Hiper-rutas Viables Mínimas en Redes Multimodales tiene un tiempo de respuesta rápido para la red de transporte que se planteó. Las pruebas realizadas para distintos pares origen-destino, con distintos números de transferencias modales, obtuvieron rutas que cumplen con los criterios requeridos para que la sucesión de modos de transporte utilizados sea posible.

Los aportes destacados en el desarrollo de la presente tesis son los siguientes:

El levantamiento de información de estacionamientos y transporte público de pasajeros existente en la zona de estudio, principalmente microbuses, que sirvió para poder crear la hiper-red de transporte público.

La creación de la hiper-red multimodal, la cual junto con el levantamiento de información es una de las partes más complejas e importantes, el diseño de los hiper-arcos es fundamental para la obtención de hiper rutas multimodales. La hiper-red multimodal presentada servirá de base para trabajos futuros.

La incorporación de la red vial para el análisis del modo auto, complementa la hiper-red multimodal con la cual pueden obtenerse rutas multimodales viables que utilizan los principales modos de transporte existentes en la zona de estudio e implica un avance significativo en sistemas de obtención de rutas.

Actualmente hay sistemas de obtención de rutas como “Google Maps” o “Nokia Maps”, este último que ha comenzado a prestar el servicio de rutas que incluye el sistema Metro y el tren suburbano dentro de sus opciones, pero aun es analizado como ruta más corta sin considerar frecuencias de paso del transporte público, además de que no proporciona rutas que utilicen microbuses o el auto particular, de manera combinada.

El cálculo de hiper-rutas viables mínimas en redes multimodales es un tema con pocos ejemplos prácticos; apenas se comienzan a realizar implementaciones funcionales en este ámbito pero sin incluir el modo auto, como el proyecto de “HiperPuma” que puede ser consultado en una fase beta en la página web del Instituto de Ingeniería de la UNAM (IINGEN) y el motor de obtención de rutas “Hyperpath” de PTV Group, empresa de software y consultoría para tráfico, logística y geomarketing, el cual puede buscar rutas con coche, autobús, Metro, bicicleta, autobús, tren, taxi y a pie, pero es de uso comercial.

La propuesta de transporte sustentable que se presenta en esta tesis hace hincapié en la integración de un Sistema de Información al Viajero SAIV con otros elementos que son: la gestión de estacionamientos, el establecimiento de zonas peatonales y la incorporación de un circuito de autobuses eléctricos que permitan la conexión entre las periferias de la zona de estudio y los sitios de interés en el Centro. La propuesta de transporte sustentable se presenta como iniciativa benéfica que permite integrar las redes de transporte de la zona, mejorando la movilidad e imagen urbana.

Las calles peatonales es un bien necesario que mejora el comercio local como se ha observado en las calles Madero y Regina del Centro Histórico del D.F., así como también existen ejemplos en ciudades europeas. En la propuesta de esta tesis se proponen calles peatonales de manera que su funcionamiento este integrado con la red de transporte y la red de estacionamientos públicos para mejorar la accesibilidad y comodidad de los peatones, las calles peatonales permitirán mejorar la movilidad peatonal en la zona, el comercio, la imagen urbana y fomentar el transporte sustentable.

Los estacionamientos dentro de la propuesta presentada quedan involucrados de manera crucial como puntos de transferencia modal entre el modo auto a cualquier otro modo de transporte que se encuentran en la zona, por lo que se propone un sistema de gestión de estacionamientos con la incorporación de señalamientos viales que permitan al usuario conocer la disponibilidad en tiempo real, de lugares donde estacionarse que se encuentran en la red.

Recomendaciones y desarrollo futuro

Un aspecto muy importante es complementar las bases de datos georreferenciados de redes de transporte público concesionado de la Ciudad de México del cual en la actualidad no se ofrece ningún tipo de información al público.

El área de estudio para obtención de rutas debe ser ampliada para ofrecer un servicio de información mediante el SAIV.

El proceso de despliegue gráfico de las rutas requiere levantar un servicio de mapas web que permita mostrar la información sin necesidad de software especializado, mediante una interfaz intuitiva que cualquier usuario pueda utilizar y comprender, y que pueda ser consultado desde cualquier dispositivo móvil y en internet. En el capítulo seis se mencionan características y ejemplos conceptuales de los softwares mediante los cuales se pudiera desarrollar la aplicación con software libre.

El código del programa debe ser optimizado para detectar posibles procesos redundantes y obtener rutas en un menor tiempo de cómputo.

Finalmente, deben implementarse nuevos modos de transporte como bicicletas, que es un complemento adecuado del transporte sustentable para la red multimodal de Coyoacán, lo que requeriría la modificación del diagrama de estados-s propuesto en el capítulo cinco.

.

REFERENCIAS

511 by area, 2011. *511 sf by area.* [En línea]
Available at: http://511.org/
[Último acceso: Octubre 2011].

Acha, J. & Espinoza, J. C., 2004. *Hacia una arquitectura nacional para los sistemas inteligentes de transporte.* Mexico: Instituto Mexicano del Transporte.

Ahuja, R., Magnanti, T. & Orlin, J., 1993. *Network Flows.* New Jersey: Prenctice Hall.

Americas Resources, 2013. *Americas Resources: el camino inteligente.* [En línea]
Available at: http://www.americasresources.com/
[Último acceso: 12 2013].

Anaya, J. J., 2009. *El transporte de Mercancias.* Madrid(España): ESIC.

Anon., 2011. *Trafficmaster intelligent driving.* [En línea]
Available at: http://www.trafficmaster.co.uk
[Último acceso: Noviembre 2011].

Anon., 2011. *Transports Quebec.* [En línea]
Available at: http://www.quebec511.gouv.qc.ca/
[Último acceso: Octubre 2011].

Antún, J., Lozano, A. & Hernández, R., 2005. Transporte de carga metropolitano: estrategias para el fomento de políticas y prácticas sustentables. *El reto del transporte en la ciudad de México: voces, ideas y propuestas..*

Antún, J. P., 2013. *Distribución Urbana de Mercancías: Estrategias con Centros Logísticos,* Internacional: BID.

atac, 2013. *atac Roma.* [En línea]
Available at: http://www.atac.roma.it/
[Último acceso: Agosto 2013].

Banister, D., 2005. *Unsustainable Transport.* USA and Canada: Routledge.

Benitez, J. C. E., 2001. *Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), señalizacion dinamica..* Mexico, D.F.: Universidad Nacional Autonoma de México, Facultad de Ingenieria.

BM, 1986. *Transportes Urbanos.* Washington: Banco Mundial.

Borges, H., Knapp, G. & y Eisenhart, B., 2001. Development of Canadian Architecture for Intelligent Transportation Systems. *Transportation Research,* Issue Record No. 1774.

Buehler, R., Pucher, J. & Uwe, K., 2009. *Making Transportation Sustainable: Insights from Germany.* Germany: Brookings Institution Metropolitan Policy Program.

Bull, A., 2003. *Congestión de Tránsito.* Chile: CEPAL.

Button, J. K. & Hensher, A. D., 2001. *Handbook of Transport Systems and Traffic Control.* Simi Valley, California, E.U.A.: Pergamon.

CICCP, 2003. *Libro Verde de los Sistemas de Transporte Terrestre.,* Madrid: Consorcio Transportes.

CINTEL, 2010. *Intelligent Transportation Systems ITS en Colombia: Estudio Cualitativo,* Bogotá: CINTEL.

CIVITAS, 2012. *Cleaner and Better Transport in Cities.* [En línea]
Available at: http://www.civitas.eu
[Último acceso: Enero 2012].

Finnis, K. & Walton, D., 2008. *Field observations to determine the influence of population size, location and individual factors on pedestrian walking speeds,* Christchurch, New Zealand: University of Canterbury.

Fisher, E. L., Rousseau, G. K., Turner , S. M. & Blais , E. J., 2010. *Pedestrian and Bicyclist Safety and Movility in Europe,* Washington: U.S. Department of Transportation.

G.O.D.F., 1997. *Programa Delegacional de Desarrollo Urbano de Coyoacán,* México DF: Gaceta Oficial del Distrito Federal.

Gallo, G., Longo, G., Nguyen, S. & Pallotino, S., 1992. Directed Hypergraphs and Aplications. *Discrete Applied Methematics.*

García de Jalón, J., Ignacio Rodriguez, J., Mingo, I. & Aitor, I., 2000. *Aprenda Java como si estuviera en primero.* Primera ed. San Sebastian, España: TECNUN.

GDF, 2012. *Delegación de Coyoacán.* [En línea]
Available at: http://www.coyoacan.df.gob.mx/
[Último acceso: 04 2012].

GDF, 2012. *ECOBICI.* [En línea]
Available at: https://www.ecobici.df.gob.mx
[Último acceso: Abril 2012].

GDF, 2012. *Metrobús.* [En línea]
Available at: http://www.metrobús.df.gob.mx
[Último acceso: 25 Julio 2012].

GDF, 2012. *Servicio de Transportes Eléctricos del D.F..* [En línea]
Available at: http://www.ste.df.gob.mx
[Último acceso: Abril 2012].

GDF, 2013. *Red de Transporte de Pasajeros.* [En línea]
Available at: http://www.rtp.gob.mx
[Último acceso: 2013].

Giosa & Viera , 2006. Un Sistema Avanzado de Información a Viajeros aplicado a la ciudad de Montevideo. *Revista Ingeniería Informática,* Volumen Edición 12.

Hansen, P., 1980. Bicriterion Path Problems. *Multicriteria Desicion Making: Theory and Aplications.*

Haunstrup , B., 2012. *Cycle copenhague.* [En línea]
Available at: http://www.cyclecopenhagen.dk
[Último acceso: 20 Febrero 2012].

Herrera, G. A., 2008. *Innovaciones en la Tecnología Aeroportuaria,* Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.

Houghton, J., Reiners, J. & Lim, C., 2009. Transporte Inteligente, como mejorar la movilidad en las ciudades. *IBM Institute for Business Value.*

IDAE, 2012. *Instituto para la Diversificacion y Ahorro de la Energia.* [En línea]
Available at: http://www.idae.es/
[Último acceso: 18 Julio 2012].

IMT, 2011. *Instituto Mexicano del Transporte.* [En línea]
Available at: http://www.imt.mx/
[Último acceso: Octubre 2011].

INDRA, 2011. *INDRA Company.* [En línea]
Available at: http://www.indracompany.com
[Último acceso: Octubre 2011].

INEGI, 2007. *Encuesta Origen Destino de la Ciudad de Mexico,* Mexico D.F.: INEGI.

ITDP, 2012. *Institute for Transportation & Development Policy.* [En línea]
Available at: http://www.itdp.org/
[Último acceso: 15 Abril 2012].

Iteris, I. L. M. A. D. T., 2002. Iteris, Inc Lockheed Martin, Architecture Development Team.. *The National ITS Architecture: A Framework for Integrated Transportation into the 21st Century.*

ITS México, 2012. *ITS México.* [En línea]
Available at: http://www.itsmexico.org.mx/
[Último acceso: Mayo 2012].

Levinson, H. S. & Wean, R. A., 2007. *Urban transportation: perspectives and prospects.* Michigan E.U.A.: Universidad de Michigan.

López, F. D., 2010. *Híper rutas más cortas con respecto del tiempo entre las instalaciones dentro de Ciudad Universitaria: Un modelo de transporte multimodal.* Mexico D.F.: UNAM.

Lozano, A., Antún, J. & F., G., 2005. *El transporte particular y los problemas de congestión.* México D.F.: Edamex.

Lozano, A. y otros, 2006. *Estudio Integral Metropolitano de Transporte de Carga y Medio Ambiente para el Valle de México (EIMTCA-MAVM),* México D.F.: s.n.

Lozano, A. & Storchi, G., 2001. *Shortest viable hyperpath in multimodal networks,* s.l.: Transportation Research Part A: Policy and Practice.

Lozano, A. & Storchi, G., 2002. *Shortest Viable Path Algorithm in Multimodal Networks.* s.l.:Transportation Research Part B.

Lozano, A., Torres, V. & Antun, J. P., 2003. Tráfico vehicular en zonas urbanas. *Ciencias,* Abril.Issue 070.

McQueen, B. & Mc Queen, J., 1999. *Intelligent Transportation Systems Architectures.* London: Artech House.

Medina, S. & Jimena, V., 2012. *Planes Integrales de Movilidad: Lineamientos para una movilidad urbana sustentable.* Primera edición ed. México: ITDP México.

Menéndez, J. M., 2008. Sistemas Inteligentes de Transporte: uU mal nombre para una buena idea (BIT). Volumen 186.

Muñuzuri, J., Larrañeta, J. & Muñoz, C., 2002. *La logística Urbana de Mercancías: Soluciones, Modelado y Evaluación.* España: Vigo.

Nguyen, S. & Pallotino, S., 1988. Equilibrium Traffic Assignment for Large Scale Transit Networks. *European Journal of Operation Research.*

Nuworsoo, C. & Cushing, K., 2012. *Integration of Bicycling and Walking Facilities into the Infrastructure of Urban Communities,* California E.U.A.: Mineta Transportation Institute.

Observatorio Tecnológico de la Energía, 2012. *Mapa Tecnológico Movilidad Electrica.* Madrid: Ministerio de Industria Energia y Turismo.

Observatorio Tecnológico de la Energía, 2012. *Mapa Tecnológico Movilidad Eléctrica.* Madrid: Ministerio de Industria Energia y Turismo.

Pallottino, S. & Scutella, M. G., 1997. *Shortest Path Algorithms in Transportation models: Classical and innovate aspects,* Universidad de Pisa: Departamento de Informática.

PBSC Urban Solutions, 2012. *Bixisystem.* [En línea]
Available at: http://www.bixisystem.com
[Último acceso: Febrero 2012].

Pozueta, J., 2008. *La Experiencia Internacional en Peajes Urbanos.* Madrid: Instituto Juan de Herrera.

Sallan, J. M., Suñe, A., Fernandez, V. & Fonollosa, J., 2002. *Métodos cuantitativos de organización industrial I.* Barcelona, España: UPC.

SCT México, 2011. *Secretaría de Comunicaciones y Transportes.* [En línea]
Available at: http://www.sct.gob.mx/
[Último acceso: Noviembre 2011].

Secretaría del Estado de Transporte de España, 2010. *Los Sistemas Inteligentes de Transporte . Su aplicación en los modos terrestre, aereo y maritimo.* España: Colegio de España.

SETRAVI GDF, 2012. *RTP del DF.* [En línea]
Available at: http://www.rtp.gob.mx
[Último acceso: Abril 2012].

SETRAVI-GDF, 2012. *Metro de la Ciudad de Mexico.* [En línea]
Available at: http://www.metro.df.gob.mx/
[Último acceso: Noviembre 2012].

Singapore Autority Land Transport, 2011. *Public Transport@SG.* [En línea]
Available at: http://www.publictransport.sg/
[Último acceso: 2011].

SL, 2011. *Storstockholms Lokaltrafik (SL).* [En línea]
Available at: https://sl.se/
[Último acceso: Octubre 2011].

Sort, J. J., 2006. *Redes Metropolitanas.* Barcelona España: Barcelona Regional.

Thomson, I., 2001. Congestión del transito urbano: Causas y consecuencias económicas y sociales. *Revista de la CEPAL,* Issue No 25.

United Nations World Commission on Environment and Development, 1987. *Brundtland Report,* s.l.: United Nations World Commission on Environment and Development.

US-DOT, 1994. *National Bicycling and Walking Study FHWA Case Study No. 19,* California E.U.A: s.n.

US-DOT, 2004. *Pedsafe: Pedestrian Safety Guide and Countermeasure Selection System,* E.U.A.: Federal Hiway of Transportation.

US-DOT, 2007. *Advanced Parking Management Systems A CROSS-CUTTING STUDY.* E.U.A.: U.S. Department of Transportation.

US-DOT, 2011. *RITA Departament of Transportation Research an Innovate Tecnology Administration.* [En línea]
Available at: http://www.its.dot.gov
[Último acceso: Noviembre 2011].

Valero Calvete , F. J., 1970. *Transportes urbanos.* San Bernardo Madrid: Dossat.

Anexo A

Procedimiento principal SVHP

```
public class SVHP {
	//Declaración de variables
	ArrayList<ArrayList<parNodoEstado>> paretoOptimal = new ArrayList<ArrayList<parNodoEstado>>();//

	public ArrayList<ArrayList<parNodoEstado>> ejecutar() {

		try{
			//Se abre desde el principio una conexion a las Base de datos
			String url ="jdbc:postgresql://localhost:5432/postgres";
			Class.forName("org.postgresql.Driver");
			Connection con = DriverManager.getConnection( url,"postgres","admin");
			if (con != null) {
				System.out.println("Conexion a base de datos ... ok");
			}
			//--Se establecen variables iniciales
			parNodoEstado primerQnow = new parNodoEstado(destino, 0);
			primerQnow.setVs(0.0);
			qNow.add(destino);
			nodosVisitados.add(destino);
			parNE = new ArrayList<parNodoEstado>();
			parNE.add(primerQnow);

			while(h <= k && qNow.isEmpty() == false){
				while(qNow.isEmpty() == false){
				destinoParcial = qNow.get(0);
				posicion = nodosVisitados.indexOf(destinoParcial);
				if (parNE.get(posicion).getVs() <= parNE.get(posicion).getLastLabel()){
				// **si es menor que last label (al principio es infinito)
					parNE.get(posicion).setLastLabel(parNE.get(posicion).getVs());
				//**asigna TiempoEsperado a hipercaminoprobar
					if (parNE.get(posicion).getVs()<costoOrigen){
					try {
						Statement stmt = con.createStatement(
						ResultSet.TYPE_SCROLL_INSENSITIVE,
						ResultSet.CONCUR_UPDATABLE);
						ResultSet rs;
						String query = "select id, h_arco, frecuencia, espera, tiemporec,
						fromid, toid, transfer, nombre, modos FROM redcoyo where toid =" +
						destinoParcial+ "and toid<>"+origen;//arcossincero
						rs = stmt.executeQuery(query);
						while (rs.next()) {
							Id = rs.getInt("id");
							hArco = rs.getInt("h_arco");
							toId = rs.getInt("toid");
							fromId = rs.getInt("fromid");
							ve = rs.getDouble("tiemporec");
							transferencia = rs.getInt("transfer");
							Modo = rs.getString("nombre");
							Modos = rs.getInt("modos");
							if (hArco == 0 && conauto != Modos){
							//--- Empieza arc Concatenation ; Conauto pregunta si se
							quiere utilizar auto o no
								arcConcatenation arcoConcatenado = new
								arcConcatenation();
								arcoConcatenado.concatenaArco(fromId, ve, Id,
								destinoParcial, posicion, contador, parNE,
								listaQnext, qNow, qNext, nodosVisitados,
								transferencia, Modo, Modos, k, h);
```

```
                                        }//--- Termina arc Concatenation
                                        if (hArco == 1){//Empieza h-arc Concatenation
                                                hArcConcatenation hArcoConcatenado = new
                                                hArcConcatenation();
                                                hArcoConcatenado.concatenaHiperArco(con,
                                                fromId, posicion, parNE, qNow, nodosVisitados);
                                                qNow.remove(0);
                                                verificador=1;
                                        }//Termina h-arc Concatenation

                                        if(transferencia==0){ //el if evita un error si el origen tiene
                                        una transferencia en su estrella
                                        int indice = nodosVisitados.indexOf(fromId);
                                        // actualiza el costo del origen cuando se calcule menor
                                                System.out.println(indice);
                                                if (indice != -1){
                                                        if (origen == fromId &&
                                                        (parNE.get(indice).getVs())
                                                <costoOrigen){ // actualiza
                                                        el filtro para el costo de origen
                                                        costoOrigen =
                                                        parNE.get(indice).getVs();
                                                        }
                                        }
                                        }
                                }//Termina primer while
                                contador=contador+1;
                                stmt.execute("END");
                                stmt.close();
                                }
                                catch (SQLException e) {
                                        e.printStackTrace();
                                }
                        }
                        else {
                                contador=contador+1;
                        }
                }
                if(verificador==0){qNow.remove(0);}
                verificador=0;
                }
                        //"clonando"
                        //se crea una copia de la lista para del cálculo con h transferencias modales
                        ABC =new ArrayList<parNodoEstado>();
                        for(parNodoEstado cadaObjeto : parNE){
                                parNodoEstado postQnow = new parNodoEstado();
                                postQnow.setVs(cadaObjeto.getVs());
                                postQnow.setCostoArco(cadaObjeto.getCostoArco());
                                postQnow.setAS(cadaObjeto.getAS());
                                postQnow.setCostoE(cadaObjeto.getCostoE());
                                postQnow.setEspera(cadaObjeto.getEspera());
                                postQnow.setEsteEstado(cadaObjeto.getEsteEstado());
                                postQnow.setEsteNodo(cadaObjeto.getEsteNodo());
                                postQnow.setFrecuencia(cadaObjeto.getFrecuencia());
                                postQnow.setIndex(cadaObjeto.getIndex());
                                postQnow.setLastLabel(cadaObjeto.getLastLabel());
                                postQnow.setNS(cadaObjeto.getNS());
                                postQnow.setPosicion(cadaObjeto.getPosicion());
                                postQnow.setModo(cadaObjeto.getModo());
                                postQnow.setWS(cadaObjeto.getWS());
                                ABC.add(postQnow);
                        }
                        paretoOptimal.add(ABC);
                        // se agrega la copia del resultado de h transferencias modales
                        // y se agrega a una lista del conjunto Pareto Optimal
                if(qNext.isEmpty() == false && h < k){
```

```
                                        //procedimiento para asignar a qnow valores de qnext.
                                                System.out.println("EMPIEZA QNEXT " + (h+1));
                                                qNow.addAll(qNext);
                                                int m=0;
                                                for (int asignaQnext:qNext){
                                                        if(nodosVisitados.indexOf(asignaQnext)!=-1){
                                                        parNE.set(nodosVisitados.indexOf(asignaQnext), listaQnext.get(m));
                                                        }
                                                        else{
                                                                nodosVisitados.add(asignaQnext);
                                                                parNE.add(listaQnext.get(m));
                                                        }
                                                        m=m+1;
                                                }
                                                qNext.clear();
                                                listaQnext.clear();
                                                h=h+1; //se aumenta h para la siguiente transferencia modal
                                        }
                                }
                                leeResultados lee = new leeResultados();//llama a la funcion leer resultados
                                lee.leeResultados(paretoOptimal, origen);
                                System.out.println("-----------------------------------------------------------------");
                                leeResultadosArcos leeArcos = new leeResultadosArcos();//llama a la funcion leer arcos
                                leeArcos.leeResultadosArcos(paretoOptimal, origen);
                        }
                        catch (ClassNotFoundException e) {
                                e.printStackTrace();
                                }
                        catch (SQLException e) {
                                e.printStackTrace();
                                }
                        return paretoOptimal;
                }
```

Anexo B

Procedimiento Concatenación de arco

```
public ArrayList<parNodoEstado> concatenaArco(int fromId, double ve,int Id, int destinoParcial, int posicion,
int contador, ArrayList <parNodoEstado> parNE, ArrayList <parNodoEstado> listaQnext, ArrayList <Integer> qNow,

ArrayList <Integer> qNext, ArrayList <Integer> nodosVisitados, int transferencia, String Modo, int Modos, int k, int h) {
        SVHP asigna = new SVHP();
        listaNS.add(destinoParcial);
        listaAS.add(Id);
        listaIndex.add(posicion);
        indice = nodosVisitados.indexOf(fromId);
        if (indice == -1 ){prueba = posicion;}
        else{ prueba = indice;}
        parNodoEstado postQnow = new parNodoEstado(fromId, 0);

//*************************************************************************************************
        //Comienza la verificación de los estados.
        //"Comienza la verificación de los estados++");
        switch (Modos){ //Selecciona entre los distintos modos de transporte (1-5)
        case 3:
                if (parNE.get(posicion).getEsteEstado() == 1 || parNE.get(posicion).getEsteEstado() == 2
                || parNE.get(posicion).getEsteEstado() == 0) {
                        if (indice ==-1) {postQnow.setEsteEstado(2);}
                        else {parNE.get(indice).setEsteEstado(2);}
                        }
                break;
         default:
                 if (parNE.get(posicion).getEsteEstado() == 0 || parNE.get(posicion).getEsteEstado() == 1 ) {
                        if (indice ==-1) {postQnow.setEsteEstado(1);}
                        else {parNE.get(indice).setEsteEstado(1);}
                        }
                else if(parNE.get(posicion).getEsteEstado() == 2){
                        System.out.println("Estado no valido, saliendo del procedimiento");
                        return null;
                break;
        }
        //System.out.println("Acabo la verificación de los estados
        if (transferencia == 1){
                if(parNE.get(posicion).getWS()<=k ){
                        wt=1;
                }
        }
        postQnow.setVs(parNE.get(posicion).getVs() + ve);
        postQnow.setNS(listaNS);
        postQnow.setAS(listaAS);
        postQnow.setIndex(listaIndex);
        postQnow.setCostoArco(ve);
        postQnow.setModo(Modo);
        postQnow.setWS(parNE.get(posicion).getWS()+wt+wtp);

        if(wt ==0){
                if (nodosVisitados.indexOf(fromId) == -1){ //Revisa si fromId ya está en Nodos Visitados
                        nodosVisitados.add(fromId);
                        parNE.add(postQnow);
                        if (qNow.indexOf(fromId) == -1){
                                qNow.add(fromId);
                        }
                }
                else{//Si ya esta se actualiza el registro.
```

```
                                        if (parNE.get(indice).getVs() > (parNE.get(posicion).getVs() + ve)
                                        //Compara, si el nuevo valor es mayor, se deja el anterior
                                                parNE.get(indice).setVs(parNE.get(posicion).getVs() + ve);
                                                parNE.get(indice).setAS(listaAS);
                                                parNE.get(indice).setNS(listaNS);
                                                parNE.get(indice).setModo(Modo);
                                                parNE.get(indice).setIndex(listaIndex);
                                                parNE.get(indice).setWS(parNE.get(posicion).getWS()+wt+wtp);
                                                if (qNow.indexOf(fromId) == -1){
                                                        qNow.add(fromId);
                                                }
                                        }
                                }
                        }
                        else{ //Si es transferencia
                                if(qNext.indexOf(fromId)==-1){// Pregunta si el nodo no está en Qnext
                                        if(nodosVisitados.indexOf(fromId) != -1){// Revisa si ya se ha visitado el nodo
                                                if ((parNE.get(posicion).getVs() + ve) < parNE.get(indice).getVs()){
                                                // si mejora el tiempo se agrega
                                                        qNext.add(fromId);
                                                        listaQnext.add(postQnow);
                                                }
                                        }
                                        else{//Si no se ha revisado se agrega a qnext
                                                qNext.add(fromId);
                                                listaQnext.add(postQnow);
                                        }
                                        System.out.println("uno " + h);
                                        System.out.println("nodo: " + fromId + " costo: " +postQnow.getVs());
                                }
                                else{ //Si ya esta revisa si se mejora el tiempo
                                                if ((parNE.get(posicion).getVs() + ve) <
                                                listaQnext.get(qNext.indexOf(fromId)).getVs()){
                                                 //Compara, si el nuevo valor es mayor, se deja el anterior
                                                listaQnext.get(qNext.indexOf(fromId)).setVs(parNE.get(posicion).getVs() + ve);
                                                listaQnext.get(qNext.indexOf(fromId)).setAS(listaAS);
                                                listaQnext.get(qNext.indexOf(fromId)).setNS(listaNS);
                                                listaQnext.get(qNext.indexOf(fromId)).setIndex(listaIndex);
                                                listaQnext.get(qNext.indexOf(fromId)).setModo(Modo);
                                                listaQnext.get(qNext.indexOf(fromId)).setWS(parNE.get(posicion).getWS()+wt);
                                        }
                                }
                        }
                        //--- Termina arc Concatenation
                        asigna.setqNow(qNow);
                        asigna.setqNext(qNext);
                        asigna.setnodosVisitados(nodosVisitados);
                        return parNE;

        }
}
```

Anexo C

Procedimiento Concatenación de Hiper Arco

```
public ArrayList<parNodoEstado> concatenaHiperArco(Connection con,int fromId, int posicion, ArrayList <parNodoEstado> parNE,
ArrayList <Integer> qNow,ArrayList <Integer> nodosVisitados) throws SQLException{

        SVHP asigna = new SVHP();
        System.out.println("Ohhhh!!! HIPER ARCO!!!...");
        String queryHA = "select id, h_arco, frecuencia, espera, tiemporec,  fromid, toid FROM redcoyo where fromid =" + fromId +
        "and h_arco=1";
        Statement stmtHA = con.createStatement(
                        ResultSet.TYPE_SCROLL_INSENSITIVE,
                        ResultSet.CONCUR_UPDATABLE);
        ResultSet rsHA = stmtHA.executeQuery(queryHA);
        ArrayList<Integer> cardinalidadHa = new ArrayList<Integer>();

        while (rsHA.next()) {
                Id = rsHA.getInt("id");
                toId = rsHA.getInt("toid");
                fromId = rsHA.getInt("fromid");
                ve = rsHA.getDouble("tiemporec");
                frec = rsHA.getDouble("frecuencia");
                cardinalidadHa.add(toId);
                System.out.println(fromId+ "-" + toId);

                if (nodosVisitados.indexOf(toId)!=-1){ //Revisa las cabezas del hiperarco, si esta en nodos Visitados:
                        listaFrecHa.add(frec);
                        qNowHa.add(parNE.get(nodosVisitados.indexOf(toId)).getVs());
                        //Se agrega a una lista de nodos del hiperarco qNowHa
                        listaHa.add(nodosVisitados.indexOf(toId)); //Se mete su ubicacion en el mismo orden a la lista listaHa
                        //Contador para ver cuantas cabezas tiene el hiperarco.
                        asHA.add(Id);
                        System.out.println("Ha sido visitado");
                }
        }
        stmtHA.execute("END");
        stmtHA.close();
                // Empieza a calcular HiperArco--------");
                for (int m=0; m<cardinalidadHa.size();m++){
                        System.out.println("Qnow "+qNow);
                        System.out.println("cardinalidad "+cardinalidadHa.size()+ " "+cardinalidadHa + " " + m);
                        System.out.println("wait: "+qNow.indexOf(cardinalidadHa.get(m)));
                }

                //---Ordena hiper arco de menor a mayor----------
                double aux;
                int auxHa;
                int auxasHa;
                Double auxFrecHa;
                for(int a=1;a<qNowHa.size();a++){
                        for(int b=0;b<qNowHa.size()-a;b++)
                                if(qNowHa.get(b)>qNowHa.get(b+1)){
                                        aux=qNowHa.get(b);
                auxHa=listaHa.get(b);
                auxFrecHa=listaFrecHa.get(b);
                auxasHa=asHA.get(b);
                qNowHa.remove(b);
                listaHa.remove(b);
                listaFrecHa.remove(b);
                asHA.remove(b);
                qNowHa.add((b+1),aux);
                listaHa.add((b+1),auxHa);
                listaFrecHa.add((b+1),auxFrecHa);
```

```
  asHA.add((b+1),auxasHa);
}
    } //--------------------------------
    //Comienza el procedimiento para calcular el hiperarco
    double val;
    int m=2;
    ArrayList<Double> Lu = new ArrayList<Double>();
    ArrayList<Integer> nodosCabeza = new ArrayList<Integer>();
    phiE = listaFrecHa.get(0);
    val =(60/phiE)+ qNowHa.get(0);
    Lu.add(val);

    int nScA=listaHa.get(0); //nScA:nodo sucesor..variara posteriormente
    double Vs =val;
    int next = 1;

    while(m<=qNowHa.size() && qNowHa.get(next)< val){
                phiE=phiE+listaFrecHa.get(next);
                double a= ((val-qNowHa.get(next))*listaFrecHa.get(next))/phiE;
                val = val-a;
                Lu.add(val);
                nScA=listaHa.get(next);
                if (val<Vs){ // Asigna el menor costo del hiperarco y su nodo sucesor del nodo cola
                        Vs=val;
                }
                Vs=val;
                m=m+1;
                next=next+1;
    } // hasta aqui ya se ha calculado el costo en la cola de hiperarco

    int hh=qNowHa.size()-1;
    for(int p = (next) ;p<=qNowHa.size()-1;p++){
    //Elimina de listaHa (cabezas del hiperarco) los nodos que no quedan en conjunto atractivo
                System.out.println("listaha:  "+listaHa+ " " + p);
                listaHa.remove(hh);/
                asHA.remove(hh);
                hh=hh-1;
                }
    System.out.println(listaHa);
    for(int p = 0 ;p<=listaHa.size()-1;p++){
                nodosCabeza.add(nodosVisitados.get(listaHa.get(p)));
                }

    if (nodosVisitados.indexOf(fromId) == -1){ //Si no está en nodos visitados (osease, entra por primera vez)
                qNow.add(fromId);
                nodosVisitados.add(fromId); //Si no está, se agrega
                parNodoEstado postQnow = new parNodoEstado(fromId, 0);
                postQnow.setVs(Vs);
                postQnow.setNS(nodosCabeza);
                postQnow.setAS(asHA);
                postQnow.setIndex(listaHa)/*.addAll(0, listaHa)*/;
                 // Indica el lugar donde se encuentra el nodo visitado.
                postQnow.setCostoArco(ve);
                postQnow.setWS(parNE.get(posicion).getWS());
                parNE.add(postQnow);
    }
    else{
                int indice = nodosVisitados.indexOf(fromId);
                if (Vs < (parNE.get(indice).getVs())){
                        if (qNow.indexOf(fromId)==-1){
                                qNow.add(fromId);
                                }
                        parNE.get(indice).setVs(Vs);
                        parNE.get(indice).setNS(nodosCabeza)/*.addAll(0, nodosCabeza)*/;
                        parNE.get(indice).setAS(asHA);
                        parNE.get(indice).setIndex(listaHa)/*.addAll(0, listaHa)*/;
```

```
                                        // Indica el lugar donde se encuentra el nodo visitado.
                                        parNE.get(indice).setCostoArco(ve);
                                        System.out.println("pruebaN "+ nodosVisitados.indexOf(fromId)+
                                        parNE.get(posicion).getWS()+">"+parNE.get(indice).getWS());

                                        if(parNE.get(posicion).getWS()>parNE.get(indice).getWS());{
                                                parNE.get(indice).setWS(parNE.get(posicion).getWS());
                                                }
                                        System.out.println("pruebaO "+ parNE.get(indice).getWS());
                                }
                        }

        asigna.setqNow(qNow);
        asigna.setnodosVisitados(nodosVisitados);
        return parNE;
}
}
```

Anexo D

Procedimiento para duplicar campos de dirección y representar en la base de datos arcos de doble sentido.

```
public class ConnPostgreSQL1 {
   public static void main(String[] argv) throws SQLException {
        int i=1; //Indice de la tabla original
        int j=1; //Indice de la "tabla copia"

      RegistrosArreglos1 registros = new RegistrosArreglos1();//Se declara l objeto en este caso "registros"

      System.out.println("-------- PostgreSQL "
                           + "Prueba de conexion con JDBC ----------");
              try {
      Class.forName("org.postgresql.Driver");
      }
      catch (ClassNotFoundException e)
      {
        System.out.println("Donde esta el driver JDBC para PostgreSQL? "
                                                              + "Incluir en la libreria");
        e.printStackTrace();
        return;
      }
              System.out.println("PostgreSQL JDBC driver registrado!");
      Connection con1 = null;

      try {
        con1 = DriverManager.getConnection(
              "jdbc:postgresql://localhost:5432/postgres", "postgres",
              "admin");
         }
      catch (SQLException e) {
        System.out.println("Falla en la conexion! Verificar consola de salida");
        e.printStackTrace();
        return;
        }
      if (con1 != null) {
        System.out.println("Conexion realizada con exito!eded");
        }
      else {
        System.out.println("Falla en la conexion!");
        }

      try{
        PreparedStatement borraTabla = con1.prepareStatement("delete from redcoyofines;");
        borraTabla.executeUpdate();

        //SELECCION DE LOS DATOS DE LA TABLA ORIGINAL Y ESCTRITURA
        //DE LOS DATOS DE DICHA TABLA A LOS ARRGELOS QUE SERVIRAN
        //PARA REALIZAR LA COPIA DE LA BD Y QUITAR LOS VALORES DE
        //-1 EN EL CAMPO DIR
        Statement stmt = con1.createStatement();
        ResultSet rs = stmt.executeQuery("SELECT * FROM preredcoyofines");
        while (rs.next()){
        //Obtiene los valores de la BD y los asigna a las correspondientes variables
        registros.ID = rs.getInt("id");

        registros.HARCO = rs.getInt("h_arco");
        registros.FREC = rs.getFloat("frecuencia");
        registros.ESPERA = rs.getFloat("espera");
```

```
        registros.TREC = rs.getFloat("tiemporec");
        registros.FROM_ID = rs.getInt("fromid");
        registros.TO_ID = rs.getInt("toid");
        registros.MODO = rs.getInt("modos");
        registros.NOMBRE = rs.getString("nombre");
        System.out.println(registros.NOMBRE);
        registros.DIR = rs.getInt("dir");
        registros.LONGITUD = rs.getFloat("longitud");
        registros.TRANSFER = rs.getInt("transfer");
        //Asignacion de los valores de la BD a los arreglos
        switch(registros.DIR) {
           case 1:
              registros.registros2arreglos(j);
              j=j+1;
              break;
           case -1:
              registros.registros2arreglos(j);
              j=j+1;
              break;
           case 0:
              registros.registros2arreglos(j);
              j=j+2;
              break;
        }
          i= i + 1; //Aumento en el indice de la BD

        }
        System.out.println("hola");
           int k=1;

           PreparedStatement escribe = con1.prepareStatement("INSERT INTO redcoyofines VALUES (?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?);");
           for (k=1;k<j;k++) {
        System.out.println(k);
                escribe.setInt(1, registros.identificador[k]);
              escribe.setInt(2, registros.harco[k]);
              escribe.setFloat(3, registros.frecuencia[k]);
              escribe.setFloat(4, registros.espera[k]);
              escribe.setFloat(5, registros.tiemporec[k]);
              escribe.setInt(6, registros.fromid[k]);
              escribe.setInt(7, registros.toid[k]);
              escribe.setInt(8, registros.modos[k]);
              escribe.setString(9, registros.nombre[k]);
              escribe.setInt(10, registros.dir[k]);
              escribe.setFloat(11, registros.longitud[k]);
              escribe.setInt(12, registros.transfer[k]);

              escribe.executeUpdate();
           }


           stmt.close();
           con1.close();
        }
        catch (Exception e) {
        System.out.println(e.getMessage());
        }

            } //Fin Main

} //Fin Clase
```