



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE  
RUTA MÍNIMA EN LA RED VIAL DE LA  
ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE  
MÉXICO (ZMVM)**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO EN COMPUTACIÓN**

**P R E S E N T A :**

**PÉREZ ALVAREZ BLANCA FABIOLA**



**DIRECTOR: Dra. ANGÉLICA DEL ROCÍO LOZANO CUEVAS**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**MÉXICO, D. F., 2009**

## *Dedicatoria*

Este trabajo esta dedicado a todas las personas que estuvieron conmigo y me apoyaron incondicionalmente en el trazo de una meta más en mi vida.

Agradezco a mis padres de las mil maneras que pueden apoyar a un hijo. Papa Javier, gracias por todos tus sacrificios tanto económicos como morales, a ti Blanca, mi madre, por tu gran amor y comprensión, a mis hermanas Karen y Wendy por confiar siempre en mí. Abuelo Felipe, sabes que eres parte de esta meta, gracias por tu apoyo y por saber siempre escucharme.

Joseba, gracias por tu incondicional apoyo y por el amor y comprensión que me has demostrado durante todo este tiempo, te amo.

La lista es inmensa de todos aquellos amigos que estuvieron en el camino, juntos compartimos desvelos, buenas y malas experiencias, amigos también son parte de este trabajo: Carolina, Sandra, Selene, Armando, Carlos Neri, Ricardo Castañeda, David, Ricardo Manríquez, Carlos Zarco, Pedro, Andrés, Heriberto, Sainez, Concepción, Richard, Mirna, Cristina, Jacobo. Gracias a PROTECO por la formación y crecimiento que me dió como becaria.

Un especial agradecimiento al laboratorio de Transportes y Sistemas Territoriales por el apoyo que me ofrecieron, gracias Alejandro Guzmán y Erika Reyes, gracias Dra. Angélica Lozano.

Pero gracias a ti, por abrirme las puertas Universidad, porque con tus conocimientos, valores y cultura formas a muchos profesionistas. Gracias profesores y también amigos: Ing. Betzabé Lizarraga, Ing. Eric Castañeda, Ing. Edgar Martínez, M.I Alejandro Mena, Juan Velázquez, Gabriel Jaramillo.

*Gracias.*

# ÍNDICE

Introducción.....	1
Objetivo.....	3

## **CAPÍTULO 1: RED VIAL DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO.....5**

1.1 Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).....	6
1.2 Marco histórico de la ZMVM.....	9
1.3 La red vial de la ZMVM.....	11
1.3.1 Infraestructura vial.....	11
1.3.2 Obras viales futuras.....	12
1.3.3 Puntos conflictivos de la red vial de la ZMVM.....	13
1.4 El problema de congestión en la red vial de la ZMVM.....	15
1.4.1 Transporte de carga.....	18
1.4.2 Acciones recomendadas para reducir la congestión vial en la ZMVM.....	20
1.4.3 Uso de tecnologías inteligentes para reducir la congestión vial.....	21

## **CAPÍTULO 2: TECNOLOGÍA GEOESPACIAL.....23**

2.1 Sistemas de Información Geográfica.....	24
2.1.1 Definición.....	24
2.1.2 Características generales de un SIG.....	26
2.1.3 Componentes de un SIG.....	28
2.1.4 Aplicaciones.....	34
2.1.5 GPS aplicados a SIG.....	36
2.1.6 El uso de Bases de Datos Espaciales en SIG.....	37

2.1.7	Los Sistemas de Información Geográfica para Transporte (SIG-T).....	39
2.2	Sistemas Inteligentes de Transporte.....	41
2.2.1	Tecnologías de transporte inteligente.....	41
2.2.1.1	Sistema de Alerta ante el Alejamiento Involuntario del Carril.....	41
2.2.1.2	Sistema de Reconocimiento de Señales de Tráfico.....	42
2.2.1.3	Detección de peatones.....	42
2.2.1.4	Control de Velocidad Variable.....	43
2.2.1.5	Sistema de Control del Conductor.....	43
2.2.1.6	Sistema de Información al Viajero.....	44
2.2.2	Una arquitectura ITS para México.....	47

**CAPÍTULO 3: EL PROBLEMA DE LA RUTA MÍNIMA EN LAS REDES DE TRANSPORTE.....51**

3.1	Grafos.....	52
3.1.1	Definición.....	52
3.1.2	Grafos no dirigidos.....	54
3.1.3	Grafos dirigidos.....	55
3.1.4	Definiciones y terminología fundamental de grafos.....	55
3.1.5	Grado de un grafo.....	57
3.1.6	Representaciones de un grafo en memoria.....	58
3.1.7	Recorridos de grafos.....	61
3.2	Algoritmo de Dijkstra para encontrar la ruta mínima en un grafo dirigido.....	62
3.2.1	Análisis de complejidad del algoritmo de Dijkstra.....	65

<b>CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE DIJKSTRA EN LA</b>	
<b>RED VIAL DE TRANSPORTE DE CARGA DE LA</b>	
<b>ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO.....</b>	<b>67</b>
4.1 Contexto en el que se desarrolla la implementación del algoritmo	
Dijkstra.....	67
4.2 Requerimientos para la implementación del algoritmo Dijkstra.....	69
4.3 Características del Sistema de Información Geográfica para el Transporte	
de Carga (SIG-TC).....	72
4.3.1 Características de la capa “Red Vial” de Transporte de Carga	
en el SIG-TC.....	74
4.4 Primera etapa de implementación: Construcción de la base de datos	
relacional para la red vial de la ZMVM.....	75
4.4.1 Descripción de los campos de la tabla “RedCargaArcos”.....	76
4.4.2 Descripción de los campos de la tabla “RedCargaNodos”.....	78
4.4.3 Descripción de la Tabla “Nodos_Vecinos”.....	79
4.4.4 Descripción Tabla “Nodos_noAsignados”.....	80
4.4.5 Descripción Tabla “NodosAsignados”.....	80
4.4.6 Descripción Tabla “RUTA_MINIMA”.....	81
4.5 Segunda etapa de implementación: Procedimientos almacenados	
para la implementación del algoritmo de Dijkstra.....	83
4.5.1 Procedimiento almacenado “DIJKSTRA”.....	85
4.5.2 Procedimiento almacenado “INICIO”.....	86
4.5.3 Procedimiento almacenado “RELAJACION”.....	87
4.5.4 Procedimiento almacenado “SiguieteNodo”.....	90
4.5.6 Procedimiento almacenado “ACTUALIZA”.....	90
4.6 Tercera etapa de implementación: Uso de transacciones en el	
algoritmo Dijkstra.....	92

## **CAPÍTULO 5: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN**

<b>DEL ALGORITMO DIJKSTRA.....</b>	<b>93</b>
5.1 Objetivo de las pruebas.....	94
5.2 Pruebas de funcionalidad en el algoritmo Dijkstra implementado.....	95
5.3 Resultados obtenidos de las pruebas de funcionalidad.....	96
5.4 Pruebas de estrés a la base de datos.....	97
5.4.1 Configuración del escenario para las pruebas de carga.....	97
5.4.2 Creación de página Web de prueba.....	99
5.4.3 Configuración de las herramientas de estrés seleccionadas.....	101
5.4.3.1 Configuración de la carga de usuarios.....	102
5.4.3.2 Resultados de las pruebas de carga.....	105
<b>Conclusiones.....</b>	<b>109</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>111</b>
<b>Anexo:SCRIPTS PARA LA CREACIÓN DE TABLAS DE LA BASE DE DATOS “ZMVM”.....</b>	<b>113</b>
<b>Glosario.....</b>	<b>117</b>

## ***INTRODUCCIÓN***

Es evidente que uno de los problemas más fuertes que actualmente presentan las grandes ciudades, como la Cd. de México, es la congestión vial. En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se mueven aproximadamente cuatro millones de vehículos diariamente. Esto ha ocasionado una compleja red de vialidades que se ha adaptado al crecimiento y expansión de la mancha urbana.

Hoy en día, se ha hecho uso de la Tecnología Geoespacial y los Sistemas Inteligentes de Transporte, las cuales contienen herramientas para la modelación de redes y la simulación, permitiendo realizar análisis del escenario actual del tráfico, y así, poder resolver problemas complejos de planificación y gestión para predecir necesidades futuras.

Entre los Sistemas Inteligentes de Transporte están los Sistemas de Información al Viajero, los cuales tienen como objetivo construir un entorno vial/carretero seguro y agradable para conductores, peatones y usuarios de los sistemas de transporte. Tal información permite asistir a los viajeros en la toma de decisiones del viaje, efectuar estimaciones de tiempo de viaje y decisiones de ruta, previo al inicio del viaje.

Con base en lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo la implementación de un algoritmo de ruta mínima, específicamente el algoritmo nominado Dijkstra. De tal manera que ayude al viajero a seleccionar la ruta óptima para llegar a su destino. En este caso, se pretende proporcionar al viajero instrucciones acerca de las vialidades que debe elegir, de manera simple, cualquier usuario introduce un origen y un destino, y será provisto de una ruta fija recomendada, es decir, de una lista de vialidades, en el orden en que debe tomarlas para llegar desde su origen hasta su destino, de tal forma que minimice la distancia recorrida.

Este trabajo contiene 5 capítulos; el capítulo 1 describe brevemente las condiciones en las cuales se encuentran la red vial de la Zona Metropolitana del Valle de México desde sus orígenes hasta el día de hoy, así como los problemas de congestión, que actualmente presentan muchas ciudades. En el capítulo 2 se presentan las nuevas tecnologías Geoespaciales que han contribuido a una mejor planificación y gestión en los problemas de transporte, y en el capítulo 3 se describe el algoritmo de ruta mínima seleccionado, que en este caso fue Dijkstra.

En el capítulo 4 se muestra el análisis, desarrollo e implementación del algoritmo seleccionado (Dijkstra), y en el capítulo 5 se muestran las pruebas y resultados finales de la implementación.

Finalmente, en la última parte se encuentran las conclusiones, un anexo de los scripts para la creación de tablas de la base de datos utilizada y un glosario de términos utilizados a lo largo del trabajo.

## ***OBJETIVO***

Implementación del algoritmo Dijkstra para encontrar la ruta mínima (distancia más corta) dados dos puntos (origen y destino) de la red vial de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), del Sistema de Información Geográfica de Transporte de Carga (SIG-TC), del Laboratorio de Transportes y Sistemas Territoriales (LTST) del Instituto de Ingeniería.

Además se requiere que la implementación del algoritmo cumpla con los siguientes requerimientos:

1. La implementación del algoritmo Dijkstra opera en la capa de bases de datos, utilizando el lenguaje declarativo SQL (Structure Query Language), y pueda ser aprovechado en cualquier gestor de bases de datos, como, Postgres, Oracle, MySQL o DB2, por mencionar los más importantes. Con esto se logra evitar la transmisión de gran cantidad de información fuera de la capa de datos, lo que muy probablemente acarrearía tráfico de información por red.
1. La implementación del algoritmo de ruta mínima formará parte de las herramientas del SIG-TC vía Web y de desarrollos futuros del LTST.
2. Que el algoritmo sea eficiente en el procesamiento de los datos, ya que debe estar diseñado para ser utilizado en entornos multiusuarios, razón por la cual también debe contar con seguridad implementada desde la propia Base de Datos.
3. Finalmente, que la implementación del algoritmo pueda funcionar sobre cualquier red vial o carretera.

## ***CAPÍTULO 1***

# ***RED VIAL DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO***

El objetivo de este capítulo es presentar un marco histórico, en el que se describen antecedentes relevantes de la red vial de la ZMVM, así como las acciones y aportaciones realizadas por entidades dedicadas al análisis y estudio del sistema de transporte en la ZMVM.

El transporte ha sido una de las actividades económicas y sociales más importantes para el hombre. Esta actividad ha crecido en importancia y complejidad, al grado que se ha vuelto indispensable utilizar modelos matemáticos y las más modernas tecnologías, para realizar análisis de redes de transporte, que contribuyan a mejorar la planificación de un transporte eficiente y sustentable.

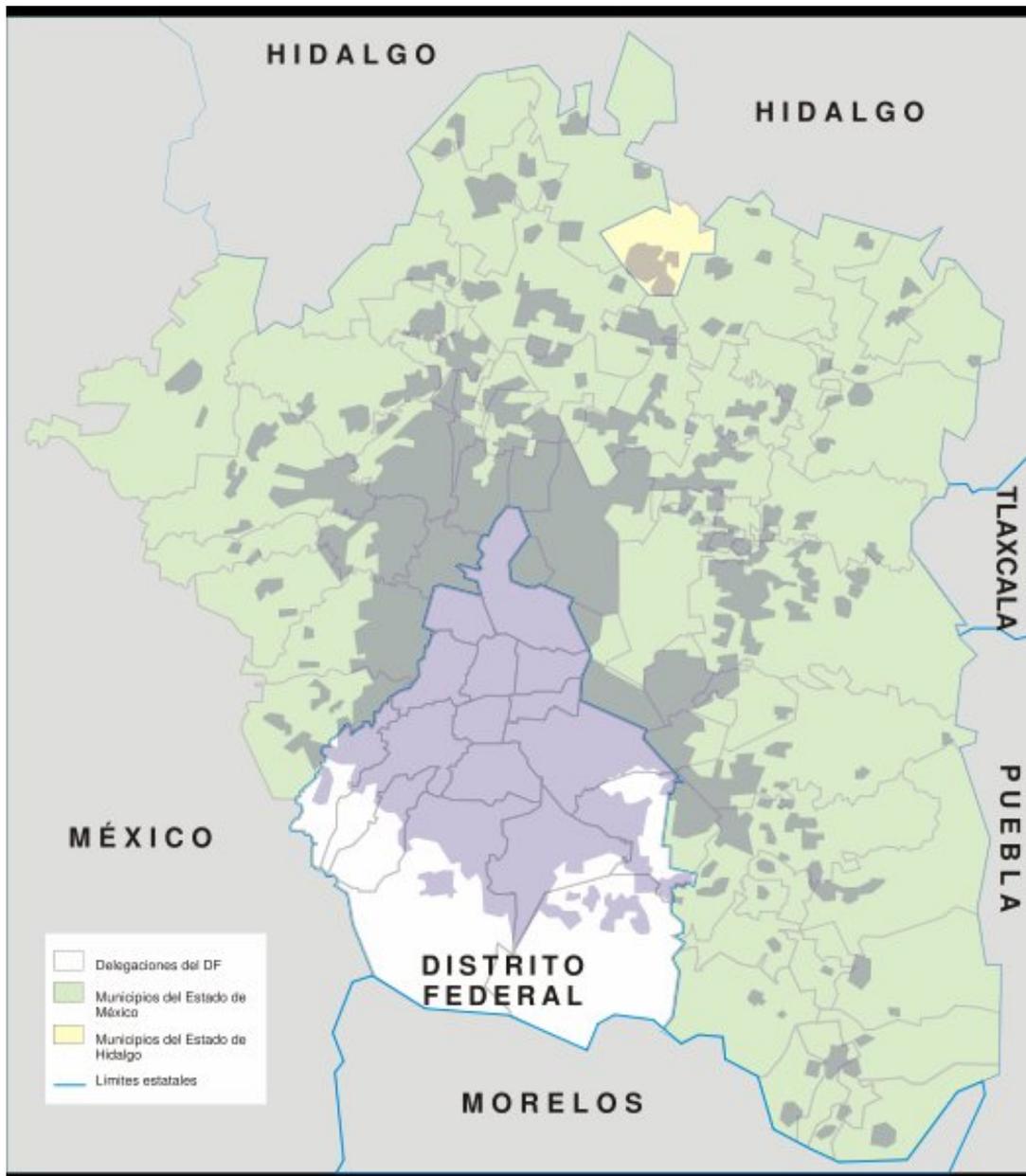
Uno de los problemas más fuertes que presentan las grandes ciudades como la Cd. de México, es la congestión vial. La red vial de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), la cual permite que diariamente millones de usuarios se transporten de un lugar a otro; atraviesa por una situación de congestión, que ha provocado a su vez problemas sociales y ambientales. Tal situación ha llevado a que investigadores estén realizando esfuerzos; en materia de transporte, para buscar alternativas que ayuden a mejorar la circulación en la red vial de la ZMVM.

## **1.1 Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)**

La ZMVM es considerada como la tercera metrópoli más poblada del mundo, después de Tokio y la Zona metropolitana de Nueva York-Filadelfia, de acuerdo con el Reporte Urbanístico de las Naciones Unidas, así como la más grande de América Latina. Según los censos que se realizaron en el 2005, se contaba con una población de 18 millones de habitantes (INEGI, 2005).

De acuerdo a la definición oficial de Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM), acordada el día 22 de diciembre del 2005 por el gobierno Federal, el Distrito Federal y el Estado de México, el AMCM estaba formada por las 16 delegaciones del Distrito Federal, 40 municipios del Estado de México y uno del estado de Hidalgo. Sin embargo, se creó además una definición normativa denominada ZMVM (Zona Metropolitana del Valle de México) basada en el pronóstico de crecimiento de la mancha urbana; ésta incluyó a 18 municipios que no eran parte de la conurbación, pero que son considerados como estratégicos (INEGI-CONAPO, 2005).

De esta manera, la ZMVM está integrada por las 16 delegaciones del Distrito Federal, 58 municipios del estado de México y 1 municipio del estado de Hidalgo (ver figura 1.1). En la tabla 1.1 se muestran las delegaciones y municipios que actualmente conforman la ZMVM.



**Figura 1.1** Municipios que contempla la ZMVM

Fuente: INEGI (2005).

**Delegaciones y municipios que contempla la ZMVM**

<b>16 delegaciones del Distrito Federal</b>	<b>58 municipios del Estado de México</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Álvaro Obregón</li> <li>-Azcapotzalco</li> <li>-Benito Juárez</li> <li>-Coyoacán</li> <li>-Cuajimalpa</li> <li>-Cauhtémoc</li> <li>-Gustavo A. Madero</li> <li>-Iztacalco</li> <li>-Iztapalapa</li> <li>-Magdalena Contreras</li> <li>-Miguel Hidalgo</li> <li>-Milpa Alta</li> <li>-Tláhuac</li> <li>-Tlalpan</li> <li>-Venustiano Carranza</li> <li>-Xochimilco</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Acolman</li> <li>-Atenco</li> <li>-Atizapán de Zaragoza</li> <li>-Chalco</li> <li>-Chiautla</li> <li>-Chicoloapan</li> <li>-Chiconcuac</li> <li>-Chimalhuacán</li> <li>-Coacalco de Berriozábal</li> <li>-Cocotitlán</li> <li>-Coyotepec</li> <li>-Cuautitlán</li> <li>-Cuautitlán Izcalli</li> <li>-Ecatepec de Morelos</li> <li>-Huehuetoca</li> <li>-Huixquilucan</li> <li>-Ixtapaluca</li> <li>-Jaltenco</li> <li>-La Paz</li> <li>-Melchor Ocampo</li> <li>-Naucalpan de Juárez</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Nextlalpan</li> <li>-Nezahualcóyotl</li> <li>-Nicolás Romero</li> <li>-Papalotla</li> <li>-San Martín de las Pirámides</li> <li>-Tecámac</li> <li>-Temamatla</li> <li>-Teoloyucan</li> <li>-Teotihuacan</li> <li>-Tepetlaoxtoc</li> <li>-Tepotztlán</li> <li>-Texcoco</li> <li>-Tezoyuca</li> <li>-Tlalmanalco</li> <li>-Tlalnepantla de Baz</li> <li>-Tultepec</li> <li>-Tultitlán</li> <li>-Valle de Chalco</li> <li>-Solidaridad</li> <li>-Zumpango</li> </ul>
	<p><b>Municipios que se incluyeron</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Amecameca</li> <li>-Apaxco</li> <li>-Atlautla</li> <li>-Axapusco</li> <li>-Ayapango</li> <li>-Ecatzingo</li> <li>-Hueypoxtla</li> <li>-Isidro Fabela</li> <li>-Juchitepec</li> <li>-Otumba</li> <li>-Ozumba</li> <li>-Nopaltepec</li> <li>-Temascalapa</li> <li>-Tenango del Aire</li> <li>-Tepetlixpa</li> <li>-Villa del Carbón</li> </ul>	<p><b>1 municipio del estado de Hidalgo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Tizayuca</li> </ul>

**Tabla 1.1** Se integraron 18 municipios del Estado de México a la ZMVM.

## **1.2 Marco histórico de la ZMVM**

El trazo de vialidades impulsó la urbanización y el crecimiento de la ciudad de México hasta convertirla en una de las más fascinantes del mundo. La asignación de una franja de terreno para la circulación de personas, el tránsito de carretas y posteriormente de automotores, reveló el dinamismo de la gran urbe.

Los cambios en el patrón de urbanización de México, durante el medio siglo pasado, se han debido en buena parte a las transformaciones que ha experimentando el modelo económico, estos cambios han propiciado, a su vez, que las perspectivas sobre la distribución territorial de la población sean vistas también de manera distinta.

Al hacer un poco de historia, el crecimiento más notable que tuvo esta ciudad en su trazo urbano se registró en los siglos XVII, XVIII y la segunda mitad del XIX. Durante la época de la conquista, el uso de los caballos y mulas por parte de los españoles, vino a revolucionar el método de transporte, por lo que empezaron a construirse carreteras.

Para los años de la independencia se seguía contribuyendo con la ampliación de rutas. Las movilizaciones de personas y mercancías se empezaron a incrementar, al igual que la economía, pero fue con la llegada del ferrocarril, en la época del Porfiriato, cuando México incrementa sus actividades económicas. De esta manera, México logra que manos extranjeras inviertan en el país, no solo en negocios personales sino en la construcción de nuevas obras públicas.

La invención del automóvil fue el detonador final para preparar en los años siguientes una bomba del tiempo, que provoca los grandes problemas de congestión que actualmente vive México y muchos países en casi todo el mundo. Con el triunfo de la Revolución Mexicana se construyeron más y mejores calles y carreteras, lo que también propició la popularidad de los automóviles, importados de Estados Unidos y Europa.

Para los años 60's, las calles de la capital mexicana ya se veían más ocupadas por automóviles, contando con 5 millones de habitantes en contraste con las 7 200 unidades de transporte público que circulaban por la capital ([www.mexicocityexplorer.com.mx](http://www.mexicocityexplorer.com.mx)).

El transporte a base de combis y microbuses se desarrolló en forma sorprendente, haciendo difícil su control y creando problemas de congestión; en tanto que el número de autobuses disminuyó. A partir de la década de los 80's, el problema de la contaminación atmosférica ocasionada por los vehículos automotores se fue incrementando.

Pronto llegó un proceso de desindustrialización, de tal forma que se optó por el traslado espacial de la industria fuera de la ciudad. Así, el Distrito Federal comenzó a perder lentamente su dinámica poblacional, para mantenerse únicamente como el receptor de los centros de decisión, tanto de las instituciones gubernamentales como de la iniciativa privada. Ya que hoy en día se puede hablar de dos grandes secciones de la ciudad: aquella que se encuentra ubicada dentro del proceso global de flujos económicos e informativos, y la otra que se mantiene como una mega – ciudad latinoamericana completamente ajena a los procesos de economía global e inmersa en las problemáticas sociales y económicas de una concentración caótica del tercer mundo. De esta forma, el alto grado de polarización y desigualdad que siempre se ha dado en la Ciudad de México, se ha modificado y se ha profundizado substancialmente (Torres V, 2006).

Para los años del 2003 al 2006, se agregaron otras obras viales de gran magnitud que indudablemente habrían de modificar la concepción e imagen que por decenios tuvo la capital del país. Sin duda todas estas vialidades son insuficientes para la coexistencia de los más de 8 millones de habitantes del Distrito Federal y los casi 10 millones de la zona conurbada, dando un total de 18 millones de personas en la ZMVM, que corresponde a un 18% de la población total del país (INEGI, 2005).

Es así que el tráfico vehicular es uno de los problemas más severos que afrontan los capitalinos y sus visitantes. De acuerdo a los reportes realizados por la SETRAVI (Secretaría de Transportes y Vialidad), se estima que aproximadamente circulan 4 millones de automotores diariamente en la

Zona Metropolitana, lo que complica la disponibilidad de espacios en el territorio del Distrito Federal (SETRAVI, 2007).

### **1.3 La red vial de la ZMVM**

En esta sección se describe la infraestructura vial de la ZMVM y los principales puntos conflictivos en vialidades principales. Además se mencionan las obras viales futuras que el gobierno del DF y del Estado de México proponen para mitigar los impactos viales que afrontan diariamente los automovilistas.

#### **1.3.1 Infraestructura vial**

De acuerdo a los reportes de la SETRAVI ([www.setravi.df.gob.mx](http://www.setravi.df.gob.mx)), la longitud total de la red vial en el Distrito Federal es de 10 mil 200 kilómetros. Aproximadamente un 9% de la red vial (913 kilómetros) corresponden a las llamadas vialidades primarias, esto es, los ejes viales, el Circuito Interior y vías de acceso controlado (Viaducto y Periférico). El resto corresponden a las vialidades secundarias, con una longitud de aproximadamente 9 269 mil kilómetros. Por su parte, los municipios conurbados disponen de 1 016 kilómetros de vías primarias y secundarias que integran una red de 103 vialidades.

Las vías de acceso controlado son aquellas vialidades que mantienen la movilidad continua de vehículos (no tienen semáforos en los carriles centrales) en su cruce con vialidades importantes; además cuentan con vías auxiliares que van desde pasos a desnivel, hasta distribuidores viales. Se les considera las columnas vertebrales de la red vial.

El Periférico Poniente y los viaductos Miguel Alemán, Tlalpan y Río Becerra son las vías de acceso controlado del DF mayormente preferidas por los usuarios. Por su parte, los ejes viales; que se distribuyen seis al norte, diez al sur, siete al oriente, siete al poniente, además del Eje

Central Lázaro Cárdenas, son vialidades semaforizadas que forman una red en toda la ciudad. Muchos de los 31 ejes viales existentes se diseñaron con carriles exclusivos para vehículos de transporte público en sentido preferencial y en contra flujo, con opciones de salida a estaciones del Metro.

Otras vías principales complementan la estructura de la red vial primaria y son las que, por sus características geométricas y su capacidad para mover mucho tránsito, enlazan y articulan gran cantidad de ejes viales. Se caracterizan por su continuidad y sección transversal constante, varían en su trazo y condiciones de operación de acuerdo a la zona geográfica en que se ubiquen.

Finalmente, no se puede dejar atrás uno de los nuevos esquemas de diseño en relación al llamado espacio vital. Se trata de la construcción del segundo piso en viaducto y periférico, que el gobierno del DF inició hace 5 años, el cual comprende una longitud total de 35 Km (SETRAVI, 2006).

### **1.3.2 Obras viales futuras**

Entre los proyectos de obras viales en el DF de gran relevancia se encuentran el proyecto Supervía Túnel Reforma y el proyecto Supervía Poniente. Dichos trabajos comenzarán hacia finales del 2008 para concluirlos en dos años y medio, de acuerdo a Ciudad en Movimiento ([www.capitalencrecimiento.com.mx/](http://www.capitalencrecimiento.com.mx/)).

SETRAVI (2007) prevé que la Supervía Túnel Reforma conecte desde Santa Fe, en el poniente, hasta Circuito Interior o Avenida Insurgentes, en el centro de la capital, mientras que la Supervía Poniente conecte la Avenida de los Poetas, delegación Cuajimalpa, hasta las avenidas Luis Cabrera y San Jerónimo, en Magdalena Contreras. La Supervía Túnel Reforma medirá entre ocho y 16 kilómetros. En tanto que la Supervía Poniente estará compuesta por túneles, puentes y vías superficiales y su longitud será de entre cuatro y siete kilómetros y cruzará las calzadas de Las Águilas, Desierto de los Leones y Las Torres.

Por otra parte el gobierno del Estado de México (EDOMEX) presentó el proyecto de la construcción del segundo piso en Periférico Norte (Viaducto Bicentenario), el cual correrá desde el Toreo de Cuatro Caminos hasta Tepetzotlán. La vialidad tendrá una longitud de 22 Km con un sentido de sur a norte, además, tendrá 13 distribuidores en igual número de intersecciones con vialidades importantes de la entidad. La arteria será de tres carriles y se estima que para el 2010 quede terminada (EDOMEX, 2007)

### **1.3.3 Puntos conflictivos de la red vial de la ZMVM**

La saturación de las vialidades genera bajas velocidades. En un estudio de aforos vehiculares<sup>1</sup> realizado en 1997 y 1998 en las vialidades primarias del DF, por la Comisión Metropolitana de Transporte y Vialidad (COMETRAVI), se concluyó que el 85% de las vialidades primarias tenían mala fluidez, lo que obligaba a desplazarse a una velocidad entre 20 y 21 km/hr, mientras que los vehículos de transporte público se desplazaban a 17 km/hr. Sólo el 15% de las vialidades restantes tenían una fluidez estable (SETRAVI, 2005).

De acuerdo a Torres (2006), en el oriente de la ciudad se tiene una amplia red a diferencia de las zonas sur-poniente y nor-poniente donde la cifra es reducida debido a las dificultades que impone lo accidentado de su topografía. También hay carencia de vías en el sentido norte-sur que faciliten la distribución de los flujos vehiculares; las existentes tienen una traza en sentido poniente-oriente. Por ejemplo, la zona poniente presenta varias problemáticas debido a que su topografía se compone de lomas separadas por barrancas, lo que impide la integración de una red vial que permita una fácil accesibilidad.

La saturación de las vías primarias como Anillo Periférico, Tlalpan, Circuito Interior, y Calzada Ignacio Zaragoza, entre otras, ha provocado que la velocidad de desplazamiento en la ciudad en

---

<sup>1</sup> Aforo vehicular es el conteo de vehículos que se lleva a cabo en un cierto punto a intervalos de tiempo determinados.

general se haya reducido drásticamente, en efectos concéntricos, hasta llegar a los 15 km/hr en promedio, sin considerar que en horario pico la velocidad disminuye hasta en 6 km/hr (SETRAVI, 2007).

Por otro lado, la red vial secundaria, registra situaciones de conflicto por falta de continuidad, sección transversal insuficiente, reducción de la capacidad por el estacionamiento indiscriminado, intersecciones conflictivas o sin semáforos, topes excesivos, mal diseñados, mal estado del pavimento, maniobras de carga y descarga sin horario establecido, cierre de calles con rejas e insuficiencia de señalización.

La reducción de la velocidad promedio en la red vial se encuentra asociada a varias causas aparte de las ya mencionadas. Este comportamiento está asociado con la programación deficiente de los semáforos. El sistema de semáforos del Distrito Federal consta de 3 070 intersecciones semaforizadas, de las cuales solamente 860 son computarizados. Esta situación es particularmente crítica en las intersecciones en las que para permitir todos los movimientos direccionales; los semáforos tienen más de dos fases, con lo que se originan pérdidas de tiempo y congestión, creando focos de emisiones contaminantes. Por último, contribuye en gran medida al congestionamiento de las vialidades, la escasa educación vial de los ciudadanos con malas prácticas para conducir y para estacionar sus vehículos (FIMEVIC, 2006).

Por otro lado, en el Estado de México gran parte de la red carretera estatal fue construida hace más de 30 años, lo cual, conjugado con las limitaciones presupuestales para su mejoramiento y conservación, implica que solamente el 77% de las carreteras pavimentadas se encuentren en condiciones de regulares a buenas condiciones de transitabilidad (Edomex, 2006).

A nivel metropolitano y urbano, la red vial también presenta problemas; en este caso, relacionados con su falta de continuidad, la falta de previsión o la invasión de los derechos de vía, nodos conflictivos y carencia de vías rápidas. Así, en los municipios metropolitanos la magnitud de los flujos, aunada a una estructura compleja y no planeada, así como insuficiente en horas pico

y mal estado de las unidades de transporte público, implican una aguda problemática que se traduce en mayores tiempos de recorrido.

La red vial del Valle Cuautitlán – Texcoco está constituida por una estructura principal de tipo perimetral, así como vías radiales que permiten la comunicación con la zona del Distrito Federal. Cuenta con cuatro accesos carreteros principales, los cuales se integran a su red vial primaria, y carece de libramientos a la Zona Metropolitana del Valle de México.

### ***1.4 El problema de la congestión en la red vial de la ZMVM***

La movilidad y el transporte son atributos y procesos vitales de la ciudad; no sólo permiten los desplazamientos de personas y mercancías, sino que determinan los patrones de desarrollo urbano (SETRAVI, 2006).

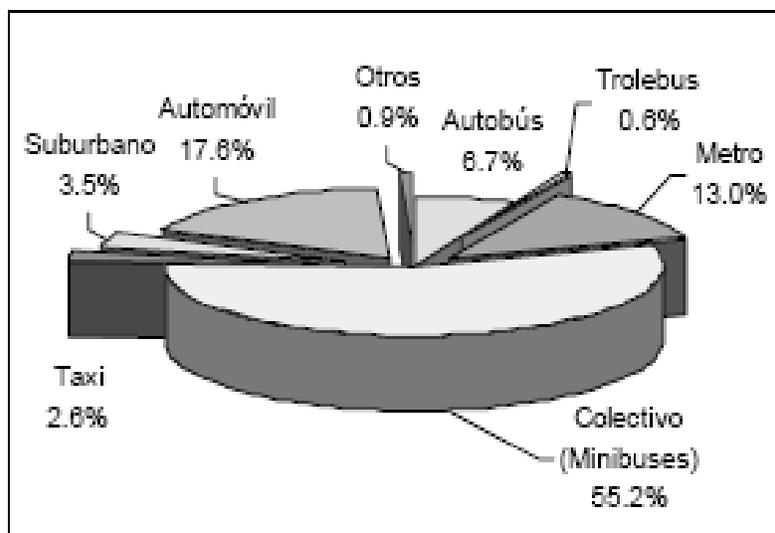
Una implicación importante de la expansión urbana es el crecimiento de la demanda de viajes, lo cual no ha ido acompañada de una adecuada infraestructura de la red de transporte. De esta forma, la movilidad en el Valle de México se enfrenta a varias distorsiones e insuficiencias, tanto en los diversos modos de transporte como en la red vial disponible, lo que ha provocado problemas de congestión.

Actualmente, la ZMVM enfrenta un severo tráfico vehicular con consecuencias negativas para el desarrollo de las actividades económicas y sociales, y con niveles altos de contaminación del aire, que afectan la salud de sus habitantes. Según el reciente estudio de Origen y Destino<sup>2</sup> metropolitano realizado por INEGI y el Distrito Federal, en la ZMVM se realizaron un total de 20.5 millones de viajes-persona-día (INEGI, 2005).

---

<sup>2</sup> Una matriz Origen-Destino registra el número de viajes realizados de cada zona origen a cada zona destino en un periodo de tiempo.

Mientras que en 1986 el transporte eléctrico (Metro, Trolebús y Tren Ligero) proporcionó el 22% de los viajes-persona-día, en el año 2000 su participación disminuyó a casi 15%, aun cuando la red del Metro creció. En cuanto al autobús, su participación también decreció, pasando en el mismo periodo de 42% a 6.7%. El espacio dejado por ambos fue cubierto por un transporte público de baja capacidad (microbuses y combis) que pasó de 6% a 55.2% en la captación de los viajes; los taxis atrajeron el 2.6% de los viajes. El restante 17% de los viajes-persona-día fue realizado en automóviles particulares (SETRAVI, 2006). Ver figura 1.2



**Figura 1.2** Utilización de los diversos modos de transporte en el DF

Fuente: SETRAVI. Programa Integral de Transporte y Vialidad 2001-2006.

El incremento desmedido en algunos modos de transporte como los automóviles y microbuses, y una infraestructura vial inadecuada, han originado serios problemas de congestión vial, que hacen más lento el traslado y acceso de y hacia la ciudad. Únicamente el 15% de las vías de acceso controlado presentan velocidades por arriba de los 30 km/h; en los horarios de mayor demanda las velocidades de operación disminuyen a un rango de hasta 7 y 15 km/h (SETRAVI, 2006).

Se estima que la ciudad de México está entre las ciudades más congestionadas por tráfico en el mundo; junto con Bangkok (Tailandia), Taipei (Taiwán) y Caracas (Venezuela), promediando 334 vehículos motorizados por kilómetro en sus calles. Refiriéndose particularmente a los vehículos privados, la Unión Internacional de Transporte Público señala que el número de éstos por kilómetro en la ciudad de México asciende a 354 (294, con datos del INEGI), superior a los 142 de la ciudad de Los Ángeles (California) y los 256 de Madrid (España) (INEGI, 2005).

La circulación vehicular puede generar, además de congestión, contaminación del aire y ruido. Lo cual es uno de los problemas más importantes que enfrenta la población mundial, y aquí el tráfico vehicular juega un papel primordial, ya que es la principal fuente de emisiones en áreas urbanas (Lozano *et al.*, 2005). Las fuentes móviles (vehículos automotores) generan el 99% del monóxido de carbono, el 81% de oxígeno de nitrógeno, y el 51% y 76% de las partículas de 10 y 2.5 micras, respectivamente (Inventario de Emisiones , 2000).

Sin duda el vehículo particular es uno de los elementos que más contribuye a la saturación de vialidades; según el inventario de emisiones de 1998, de los cerca de 2.5 millones de toneladas de contaminantes emitidos a la atmósfera, 84% provinieron de fuentes móviles, es decir, de todo tipo de automotores. Cada viaje-persona-día en autos privados implicó un consumo de alrededor de 19 veces más energía que los autobuses, nueve veces más que el transporte colectivo de ruta fija (combis y minibuses), 62 más que el Metro y 94 veces más que los trolebuses. (SMA, 2006)

La congestión también tiene impacto sobre la vida cotidiana de la gente, quien invierte parte importante de su tiempo en desplazarse, reduciendo así su tiempo para realizar otras actividades, por lo que tienen efectos negativos en la eficiencia de la economía de la ciudad por los desplazamientos cada vez más lentos (Lozano *et al.*, 2005).

### **1.4.1 Transporte de carga**

El transporte de carga ocupa, después del automóvil particular y los taxis, el tercer lugar del sector transporte como fuente emisora de contaminantes a la atmósfera, participando con el 24% del total. Así, el transporte de carga en la ZMVM tiene diversos impactos, tanto positivos como negativos; por un lado contribuye al desarrollo económico, y por el otro a la congestión y emisiones.

El principal conflicto que genera el transporte de carga es la permanente obstrucción del flujo vehicular, sea por su lentitud, la invasión de carriles de alta velocidad o las maniobras de carga y descarga en vías secundarias y hasta en vialidades primarias. Sin embargo, la ZMVM exige la movilización de más de 390 millones de toneladas anuales de insumos y productos, lo que convierte al transporte de carga y su distribución en una actividad estratégica para el sostenimiento de la economía.

Este sector se integra por un parque cercano a los 440 mil 680 vehículos, de los cuales 44% corresponde a unidades de transporte urbano de carga mercantil y privado de carga del DF; el 34% al Servicio de Carga del Estado de México, y el 18% al Servicio Público Federal. Por otro lado, el Servicio Público Local de carga del DF representa sólo el 4% del total de unidades de carga registradas en la ZMVM. Algunas de las vialidades internas más utilizadas por el transporte de carga son Anillo Periférico, Eje Central, Ignacio Zaragoza, Circuito Interior y Ermita Iztapalapa (Lozano *et al*, 2006).

El “Estudio Integral Metropolitano de Transporte y Medio Ambiente” realizado por el Laboratorio de Transportes y Sistemas Territoriales del Instituto de Ingeniería (LTST) de la UNAM, establece que entre las principales problemáticas detectadas en el transporte de carga, se encuentran: la falta de espacio para operaciones de carga y descarga en la vía pública, las características geométricas inadecuadas de las vialidades y la falta de señalización (Lozano *et al*, 2006).

Otro aspecto importante en el transporte de carga, es que no cuenta con horarios y rutas, lo que ocasiona que durante todo el día circulen camiones y trailers. A principios del 2005, el Gobierno del DF en colaboración con la SETRAVI y SMA (Secretaría del Medio Ambiente), así como organismos empresariales del sector privado; aplicaron un programa piloto para mejorar la circulación vehicular del transporte de carga en vialidades del Distrito Federal, con el objetivo de disminuir las emisiones contaminantes. En dicho convenio se establecieron las características de los vehículos articulados cuya circulación fue limitada a horarios y vialidades específicas, éste restringió su uso en horario de lunes a viernes de 7 a 9 de la mañana para dar continuidad a los accesos carreteros de Pachuca, Texcoco, Puebla, Cuernavaca, Toluca y Querétaro. Pero falló, por tratarse de una acción voluntaria (SMA, 2006).

Una de las recomendaciones del “Estudio Integral Metropolitano de Transporte de Carga y Medio Ambiente para el Valle de México” (Lozano *et al*, 2006) es la creación de corredores de carga para el transporte pesado, con características adecuadas para la circulación de camiones (vehículos medianos y pesados), así como la modificación de infraestructura vial en puntos conflictivos, con una buena información y señalización adecuada. Los corredores no deberán ser para uso exclusivo de camiones, ya que también deberán ser utilizados por otros vehículos, pero deben ser diseñados para la adecuada circulación de los vehículos de carga medianos y pesados. En el estudio mencionado se recomienda también crear un Observatorio de Transporte de Carga de la ZMVM, el cual conozca la situación del transporte de carga en la ZMVM, así como las tendencias en la materia, y sea el responsable de mantener actualizada la información sobre las empresas, conozca sus necesidades y lleve una buena comunicación con éstas.

### **1.4.2 Acciones recomendadas para reducir la congestión vial en la ZMVM**

Las recomendaciones citadas en esta sección son tomadas de (Lozano *et al.*, 2002-2003).

- 1) La expansión de la red vial, es decir la construcción de la vialidad o mejoramiento de la vialidad existente, podría verse como una alternativa para reducir la congestión. Sin embargo una vez que se mejora una parte del sistema vial, existe un tráfico inducido (atraído de otras rutas) por este mejoramiento, que hace que después de poco tiempo se congestione la parte mejorada anteriormente. La expansión de la red es una medida muy costosa, que puede provocar una infraestructura, que estaría subutilizada fuera de la horas pico, sin embargo puede, siempre que se realicen análisis adecuados, tener beneficios tales como: permitir la circulación simultanea de más vehículos, que antes en el segmento mejorado no podían circular y contribuir a descongestionar otras partes de la red (Downs, 2004).
- 2) Otra opción es expandir el transporte público, pero aquí también se presenta el fenómeno de tráfico inducido para un mejoramiento al sistema. Además algunos estudios han concluido que la construcción de tren ligero o metro, raramente reduce la congestión a las horas pico (Downs, 2004); esto se debe a que relativamente poca gente que usa su propio vehículo está dispuesta a utilizar el transporte público.
- 3) Otras acciones son: restringir el uso de algunos carriles (para vehículos con alto nivel de ocupación, para vehículos de transporte de carga, para vehículos de transporte público de pasajeros); establecer un sistema de peaje, fijo o variable, por utilizar cierto segmento de la vialidad y/o por acceder a ciertas zonas urbanas.
- 4) Considerar el problema como metropolitano. Crear un ente responsable de la planificación del transporte y la vialidad metropolitanos, que genere las políticas de transporte, vialidad y crecimiento urbano, para la ZMVM. Este ente debe tener mayor

poder de decisión que las Secretarías correspondientes del Distrito Federal y el Estado de México.

- 5) Obtener información reciente y confiable. Establecer un programa permanente de aforos vehiculares distribuidos en toda el área urbana, y hacer un estudio origen-destino de los viajes en la ciudad, para saber cuales son las necesidades actuales de la población.

### **1.4.3 Uso de tecnologías inteligentes para reducir la congestión vial**

Actualmente existen herramientas como la modelación de redes y la simulación que permiten realizar análisis del escenario actual del tráfico, y así, poder resolver problemas complejos de planificación y gestión para predecir necesidades futuras.

Un aspecto importante en el análisis de redes, es que puede ser combinado con un análisis espacial, para considerar características del territorio tales como usos del suelo, crecimiento de la mancha urbana y datos demográficos o socioeconómicos, surgiendo así la posibilidad de crear escenarios del tipo ¿que pasaría sí?, para cambios en la infraestructura vial o en la demanda (Lozano *et al.*, 2002-2003).

La gestión de la vialidad mediante sistemas de control de tráfico, puede ser realizada mediante técnicas como los sistemas de acceso y de transporte inteligente, que permiten describir el comportamiento del tráfico, o predecir o recomendar un patrón de flujo vehicular en la red.

Los sistemas de control en vías rápidas permiten la entrada gradual de los vehículos en la vialidad para mejorar la velocidad en la misma. Los sistemas de transporte inteligente incluyen semáforos sincronizados e inteligentes, señalización variable de acuerdo a las condiciones de tráfico y sistemas de información de las condiciones del tráfico en tiempo real. Estos últimos tiene el objeto de recomendar rutas de acuerdo con el tiempo de viaje esperado en éstas, ya sea para que

el usuario tome mejores decisiones sobre sus horas de salida y rutas, o para mejorar el comportamiento del tráfico, reduciendo la congestión y proporcionando condiciones suaves de tráfico. Este tema se describirá con más profundidad en el siguiente capítulo.

Lo más recomendable es utilizar la combinación de las acciones mencionadas anteriormente, en forma simultanea, para atacar el problema de la congestión por distintos frentes. También se deben dar alternativas para eliminar el estacionamiento en vía pública y eliminar las obstrucciones en la vialidad; así como planificar un crecimiento ordenado de la ciudad, con el objeto de hacer que las necesidades de viaje sean menores (Lozano *et al.*, 2002-2003).



## ***CAPÍTULO 2***

### ***TECNOLOGÍA GEOESPACIAL***

Para planear, organizar, gestionar y evaluar las necesidades que se tienen en materia de transporte, se ha hecho uso de la tecnología geoespacial, que es tecnología de análisis, modelado y despliegue de datos espacialmente referenciados. En este capítulo se presenta la importancia que han tenido estas tecnologías, ya que han revolucionado la manera de ver o resolver los problemas que se tienen en los sistemas de transporte, tales como el uso de imágenes de satélite, el GPS (Sistema de Posicionamiento Global) y su integración con los llamados SIG (Sistemas de Información Geográfica); presentados en la sección 2.5, que muestran una creciente demanda como fuente de datos, para apoyar una amplia gama de necesidades de información espacial requeridas por diversas disciplinas, campos y problemáticas.

Entre los SIG se encuentran los Sistemas de Información Geográfica para el Transporte (SIG-T), que permiten la planificación de viajes y la optimización de rutas, entre otras aplicaciones, los cuales se presentan en la sección 2.

Finalmente, en la última sección, se describen otras de las nuevas tecnologías que ha experimentado el área de transporte en los últimos 10 años. Se trata de los llamados Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT) que al igual que los SIG, son tecnologías avanzadas de captura y procesamiento de información, comunicaciones y control, para mejorar la operación de los sistemas de transporte. Es importante mencionar que a pesar de que en México se han desarrollado pocas aplicaciones en SIT, por el alto costo que implican; se han hecho estudios de sustentabilidad para poder implementarlos, por lo cual vale la pena mencionar las propuestas que promueven una arquitectura SIT para México.

Las tecnologías de transporte inteligente son de gran importancia para este trabajo, ya que el objetivo de éste es la implementación de un algoritmo de ruta mínima en un sistema de información al viajero, que le permita a cualquier usuario seleccionar la mejor ruta de su origen a su destino, lo cual en un principio será realizado en modo estático mediante un SIG.

## **2.1 Sistemas de Información Geográfica**

Ligados en sus orígenes al manejo de grandes bases de datos y a cartografía automatizada, los SIG (Sistemas de Información Geográfica) han desbordado esos campos y han situado su función en el manejo y análisis de la información que los define (Backhoff *et al.*, 2002). Los SIG son resultado de desarrollos de cómputo; llevados a cabo por diversas disciplinas y técnicas relacionadas con el procesamiento de datos espaciales (cartografía, fotogrametría, tecnología de sensores remotos, geometría computacional, representación gráfica, entre otros).

Como herramienta técnica desarrollada en el campo del quehacer geográfico, los SIG han destacado por el hecho de facilitar las tareas básicas características de la Geografía: análisis, integración y síntesis de los procesos espaciales.

### **2.1.1 Definición**

Las definiciones tradicionales describen los SIG como un conjunto de *hardware*, *software*, datos, personas y procedimientos; organizados para capturar, almacenar, actualizar, manejar, analizar y desplegar eficientemente rasgos de información referenciados geográficamente (NCGIA, 1990).

Una definición más actual, y puntual es la de “un sistema que por medio de computadoras y datos geográficos ayuda a un mejor entendimiento del mundo y permite resolver problemas que se presentan diariamente” ([www.gis.com](http://www.gis.com)).

Genéricamente, los SIG relacionan información de dónde están las cosas (ubicación geográfica) con información de cómo son esas cosas (atributos).



### **2.1.2 Características generales de un SIG**

Existe una variedad de SIG para diferentes sectores, tales como los SIG-T, aplicados al transporte. A continuación se presentan las características generales de un SIG.

**a) Permite observar gráficamente en un mapa la localización de objetos espacialmente referenciados.**

Un SIG permite ver el mundo y lo que hay en él, con una perspectiva distinta a la forma tradicional de obtención, procesamiento y análisis de información que existía hace años. Con el empleo de esta tecnología es posible observar gráficamente la localización de objetos, hechos o fenómenos que tengan una expresión espacio-temporal; por ejemplo, las áreas de influencia, las relaciones geográficas y las tendencias regionales, con ello es posible realizar correlaciones de variables sociales y ambientales, calcular distancias y áreas; diseñar estrategias, construir modelos matemáticos, identificar rutas de acceso o evacuación y estimar las necesidades de equipamiento urbano o de infraestructura en general; para una localidad o región. Un SIG permite manipular distintas clases de objetos, relacionar las clases entre sí y formar jerarquías de objetos entrelazados.

**b) Los mapas en un SIG cambian dinámicamente en la medida que los datos alfanuméricos son actualizados.**

A través de un SIG los mapas pueden ser integrados y correlacionados fácilmente con múltiples datos. De hecho, mediante un campo común de referencia, cualquier información en una tabla puede visualizarse en un mapa instantáneamente, y cualquier problema representado en un mapa puede analizarse varias veces. Al contrario de lo que sucede con mapas tradicionales, los mapas en un SIG cambian dinámicamente en la medida que los datos alfanuméricos son actualizados (Backhoff *et al.*, 2002).

En la práctica, un SIG puede mapear cualquier información que esté almacenada en bases de datos o tablas que tengan un componente geográfico, lo cual posibilita visualizar patrones, relaciones y tendencias. Con el SIG se tiene una perspectiva nueva y dinámica en el manejo de la información, con el fin de ayudar a tomar mejores decisiones.

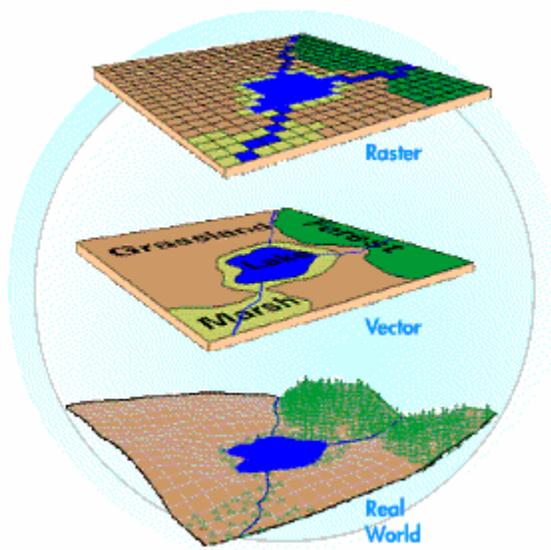
**c) Permite aprovechar las bases de datos estadísticas para hacer un análisis espacial.**

Aparte de la información geográfica, que incluye localización, morfología y estructura, los objetos geográficos tienen información asociada de carácter no-geográfico organizada en atributos. Para que las bases de datos estadísticas tengan sentido de análisis espacial, deben estar ligadas con las bases de datos geográficas, ya que de no ser así se estaría desperdiciando la potencialidad del SIG y no se aprovecharían las virtudes de la representación territorial.

**d) El tipo de formato para almacenar la información puede ser raster y vectorial.**

El modelo de SIG *raster* o de retícula se centra en las propiedades del espacio más que en la precisión de la localización. Divide el espacio en celdas regulares donde cada una de ellas representa un único valor. Cuanto mayor sean las dimensiones de las celdas (resolución) menor es la precisión o detalle en la representación del espacio geográfico ([www.humboldt.org.co](http://www.humboldt.org.co)).

En el caso del modelo de SIG *vectorial*, el interés de las representaciones se centra en la precisión de localización de los elementos sobre el espacio y donde los fenómenos a representar son discretos, es decir, de límites definidos. Para modelar digitalmente las entidades del mundo real se utilizan tres objetos espaciales: el punto, la línea y el polígono, los cuales son codificados y almacenados como una colección de coordenadas x, y ; un aspecto de cómo son representados gráficamente puede verse en la figura 2.2.



**Figura 2.2** Representación gráfica de los modelos vector y raster

Fuente: <http://mipagina.cantv.net/dolmary/Pagina/PaginasSIG/SistemasdeIG.htm>.

### **2.1.3 Componentes de un SIG**

Un SIG trabaja como cualquier sistema de información computarizado, de manera integrada con cinco componentes fundamentales: equipo o *hardware*, programas o *software*, datos, personal y métodos o procedimientos (Backhoff *et al.*, 2002).

#### **Equipo (*hardware*)**

El *hardware* es la computadora con la cual opera el SIG; para estos sistemas se requiere de equipos con alta velocidad de procesamiento y con capacidad de despliegue y almacenamiento de datos digitales. Existen en el medio diferentes equipos, marcas y configuraciones, que van de acuerdo con las necesidades del usuario. En un ambiente corporativo se utilizan generalmente servidores y equipos de escritorio conectados en red.

También hacen parte del *hardware* los periféricos o equipos adicionales, como son: “plotters” para impresión de mapas, mesas digitalizadoras, “scanners”, impresoras y unidades de almacenamiento.

### **Personal**

Una limitante actual de la tecnología de SIG, se refiere a la dificultad de las organizaciones y dependencias para encontrar expertos o especialistas que administren el sistema y desarrollen planes y programas que puedan ser aplicados. De aquí que la capacitación del personal involucrado se convierta en la clave del éxito de los proyectos SIG. El personal se clasifica en forma general en expertos, usuarios especialistas y usuarios finales. Los expertos son quienes diseñan y mantienen el sistema; los usuarios especialistas son quienes realizan las consultas y análisis e introducen los datos; los usuarios finales son quienes consultan la información y la visualizan.

### **Programas (*software*)**

El *software* o programas para SIG proveen las funciones y las herramientas necesarias para almacenar, acceder, analizar, visualizar y representar cartográficamente la información geográfica. Se debe disponer de herramientas para entrada, manipulación y salida de la información geográfica, entre las que se encuentran:

- Herramientas que soporten consultas espaciales y estadísticas, análisis y visualización.
- Una interfaz gráfica (GUI) para que el usuario acceda fácilmente a las herramientas.
- Software para procesamiento de imágenes, elaboración de mapas, transformación de coordenadas y visualización tridimensional.

Los diferentes programas de SIG en el mercado varían en funcionalidad y costo. La siguiente tabla 2.1 muestra las características generales de algunos paquetes de *software* o programas más usuales:

**Características generales de SIG comerciales**

Software	Desarrollador	Características principales
Arc/info	Environmental Systems Research Institute (ESRI)	<p>Modular, con facilidades para desarrolladores de sistemas y usuarios de nivel <i>profesional</i>.</p> <p>Construcción de topología.</p> <p>Manejo de grandes volúmenes de datos. Manejo de información en formato vectorial y raster.</p> <p>Interfaz gráfica mejorada. Altamente flexible.</p> <p>Juego rico de herramientas que automatiza muchos aspectos de cartografía.</p> <p>Soportado para plataformas Windows.</p>
Grass	Armada de los EEUU	<p>SIG Raster. Fue desarrollado para cumplir funciones muy específicas.</p>
gvSIG	Se distribuye bajo licencia GNU GPL.	<p>Acceso a los formatos más usuales de forma ágil tanto ráster como vectoriales.</p> <p>Integra en una vista datos tanto locales como remotos a través de servidores de mapas que cumplan los estándares OGC como WMS (Web Map Service), WFS (Web Feature Service), WCS (Web Coverage Service), Servicio de Catálogo y Servicio de Nomenclator.</p> <p>Está orientada a usuarios finales de información de naturaleza geográfica, sean profesionales o de administraciones públicas.</p> <p>Soportado por plataformas Linux, Mac OS X y Microsoft Windows.</p>

**Tabla 2.1** Cuadro comparativo de algunos de los programas de SIG más usuales.

### Características generales de SIG comerciales

Software	Desarrollador	Características principales
ArcView	Environmental Systems Research Institute (ESRI)	<p>Manejo y uso de datos extensos. Puede crear, manejar y organizar datos geográficos, datos tabulares, y metadatos.</p> <p>Manejo de Información en formato vectorial y raster.</p> <p>Interfaz gráfica muy amigable. Altamente flexible.</p> <p>Curva de Aprendizaje rápida. Soportado para plataformas Windows.</p>
ArcGIS	Environmental Systems Research Institute (ESRI)	<p>ArcGIS permite la publicación de datos en formato PDF, KML, soporta la integración de servicios de las últimas especificaciones OGC para compartir la información con cualquier aplicación.</p> <p>Trabaja con nuevas bases de datos como Postgres 8.3.0, SQL Server 2008.</p> <p>La nueva API de ArcGIS Server permite la integración de servicios WEB en único mapa y una única aplicación.</p>
MapInfo	MapInfo corp	<p>Opera sobre plataformas Windows, Mac OS</p> <p>Acepta archivos AutoCAD, DXF / Raster: jpg, gif, tiff, bmp.</p> <p>Acepta bases de datos externas (Oracle, MySQL, Access) y conexión con otros SIG (ArcGis).</p>
GeoTools	Se distribuye bajo licencia GNU GPL.	<p>GeoTools es un conjunto de herramientas de java accesible a código fuente, que sirve para desarrollar mapas geográficos interactivos.</p> <p>Es una herramienta de productividad para Autocad.</p>
TransCad	Caliper Corporation	<p>Un poderoso SIG para el transporte. Tiene herramientas dedicadas al área de transporte para crear, manipular y desplegar rutas.</p> <p>Creación de modelos para la planeación de transporte.</p> <p>Aplicaciones para módulos de creación de rutas, previsión de la demanda de viajes, transporte público, logística y gestión del territorio.</p> <p>Soportado para plataformas Windows.</p>

**Tabla 2.1** Cuadro comparativo de algunos de los programas de SIG más usuales (continuación).

## Datos

Los datos son una componente muy importante en un SIG. Los datos espaciales y tabulares relacionados, pueden ser recolectados directamente o adquiridos de proveedores comerciales de datos. Muchos SIG emplean un manejador de bases de datos relacional (RDBMS *Relational Database Management Systems*) para crear y mantener una base de datos que ayude a organizar y administrar estos mismos (Backhoff *et al.*, 2002).

Actualmente, los SMBD (Sistemas Manejadores de Bases de Datos) se especializan en el almacenamiento y manejo de todo tipo de información, incluyendo datos geográficos. Los SMBD están perfeccionados para almacenar y retirar datos, y muchos SIG se apoyan en ellos para este propósito; Sin embargo, no tienen las herramientas comunes de análisis y de visualización de los SIG (Backhoff *et al.*, 2002).

En esencia, el SIG es un sistema de gestión de base de datos (DBMS), específicamente diseñado para el tratamiento simultáneo de datos espaciales e información descriptiva relacionada. Un DBMS proporciona un lenguaje para análisis de datos que permite al usuario describir los mecanismos o métodos utilizados por aquel. También debe contar con procedimientos adecuados para comprobar la coherencia de los datos y mantener su integridad (<http://www.humboldt.org>).

Además del DBMS, el SIG presenta muchas posibilidades, similares a las de la automatización de la cartografía, debe permitir el tratamiento de datos descriptivos no gráficos, como la información estadística, conjuntamente con los datos espaciales a los que están relacionados. Para que un sistema pueda considerarse un verdadero SIG, debe tener la capacidad de relacionar esos dos tipos de datos (<http://www.humboldt.org>).

La mayoría de los SIG que existen en el mercado permiten la conectividad a los DBMS más comunes que operan sobre plataforma UNIX como son: ORACLE (Oracle Spatial 10g), PostgreSQL y sobre plataformas Microsoft como SQL Server.

El acopio o generación de datos en el formato, escala y proyección cartográfica adecuada, suele ser la etapa de mayor consumo de tiempo y costo; El proceso de integración de la información necesaria puede consumir hasta 85% del costo total de un proyecto de aplicación de SIG. Inclusive, aun cuando las bases de datos hayan sido completadas, el énfasis se traslada hacia su mantenimiento y actualización, dado el carácter multianual de la mayoría de los proyectos SIG; en estos casos, la administración de la información puede ser todavía más costosa y compleja que el acopio inicial. Por lo anterior, se afirma que uno de los grandes problemas en la instrumentación de un SIG es la información. El proceso de automatización de datos es tal vez la componente crítica de los proyectos, y una buena recomendación en el proceso de conversión de datos es tener un buen sistema de control de calidad (Daratech, 2000). La información puede provenir de fuentes diversas, ya sean manuscritos, mapas en papel, mapas digitales, GPS, imágenes de satélite, ortofotos, etc.

La digitalización es tal vez el método más conocido de conversión, sin embargo subsisten problemas cuando no se tiene en cuenta que la información va a ser utilizada en un sistema de información geográfica. Un error común es el no cierre de polígonos que es fundamental en el cálculo de áreas. Otro proceso común es la conversión entre formatos.

Actualmente, otra fuente para la obtención de información que puede ser utilizada en un SIG es Google Earth, que además permite visualizar en 3D el planeta, combinando imágenes de satélite, mapas y el motor de búsqueda Google. Con esta herramienta es posible localizar la dirección exacta e información de un lugar, medir distancias geográficas, entre otras aplicaciones (<http://earth.google.com/>).

### **Métodos y procedimientos**

El éxito de operar el SIG depende de un buen diseño de planes y estrategias, teniendo en cuenta que los modelos y las prácticas operativas son particulares de cada organización. Los procedimientos determinan cómo realizar tareas, tales como la forma de introducir la información en formato digital, la forma de almacenamiento y los formatos de salida de información. En este

punto es importante definir muy bien los metadatos, el diccionario de datos, estructura, diagrama de flujo, etc.

### **2.1.4 Aplicaciones**

En la mayoría de los sectores, los SIG pueden ser utilizados como una herramienta de ayuda a la gestión y toma de decisiones, algunos de ellos se mencionan a continuación (<http://www.gis.com>).

#### **Cartografía automatizada**

Las entidades públicas han implementado este componente de los SIG en la construcción y mantenimiento de planos digitales de cartografía. Dichos planos son luego puestos a disposición de las empresas, que les puedan resultar de utilidad. Las propias entidades se encargan posteriormente de proveer versiones actualizadas periódicamente.

#### **Gestión territorial**

Son aplicaciones SIG dirigidas a la gestión de entidades territoriales. Facilitan labores de mantenimiento de infraestructuras, mobiliario urbano, etc., y permiten realizar una optimización en los trabajos de mantenimiento de empresas de servicios. Tienen la facilidad de generar documentos con información gráfica y alfanumérica.

#### **Medioambiente**

Son aplicaciones implementadas por instituciones de medioambiente, que facilitan la evaluación del impacto medioambiental en la ejecución de proyectos. Integrados con sistemas de adquisición de datos, permiten el análisis en tiempo real de la concentración de contaminantes, a fin de tomar las precauciones y medidas pertinentes. Facilitan una ayuda fundamental en trabajos tales como repoblaciones forestales, planificación de explotaciones agrícolas, estudios de representatividad caracterización de ecosistemas, estudios de fragmentación, estudios de especies, etc.

### **Equipamiento social**

Son implementación de aplicaciones SIG dirigidas a la gestión de servicios de impacto social, tales como: servicios sanitarios, centros escolares, hospitales, etc.; suministrando información sobre los centros ya existentes en una determinada zona y ayudando en la planificación de la mejor localización de nuevos centros. Un buen diseño y una buena implementación de estos SIG aumentan la productividad al optimizar recursos, porque permiten asignar de forma adecuada y precisa los centros a los usuarios y así, cubrir de forma eficiente la totalidad de la zona de influencia.

### **Recursos mineros**

El diseño de estos SIG facilitan el manejo de un gran volumen de información generada durante varios años de explotación intensiva, suministrando funciones para la realización de análisis de elementos puntuales (sondeos o puntos topográficos), lineales (perfiles, tendido de electricidad), superficies (áreas de explotación) y volúmenes (capas geológicas). Facilitan herramientas de modelamiento de las capas o formaciones geológicas.

### **Tráfico y Logística**

SIG utilizados para modelar la conducta del tráfico, determinando modelos de circulación por una vía en función de las condiciones de tráfico y longitud. Asignando un costo a los nodos (o puntos) en los que puede existir un semáforo, se puede obtener información muy útil relacionada con análisis de redes.

Por ejemplo, “Lo Jack” es un sistema integral de localización, recuperación y entrega de vehículos robados que opera mediante un dispositivo oculto instalado aleatoriamente en el vehículo. Este dispositivo al ser activado permite la rápida localización del vehículo por medio de coordenadas georreferenciadas en un mapa que se encuentra en un Sistema de Información Geográfica. Este sistema es actualmente utilizado tanto por vehículos particulares como por flotas de vehículos de carga.

### 2.1.5 GPS aplicados a SIG

El Sistema de Posicionamiento Global es un programa de navegación y posicionamiento basado en satélites. El Navigation Satellite Timing and Ranging (NAVSTAR) Global Positioning Systems (GPS), nombre completo del sistema, es un programa que surgió con el financiamiento del gobierno de los Estados Unidos y la administración del Departamento de Defensa de ese país; desde 1983 fue liberado para uso civil.

La tecnología GPS es usada principalmente como una herramienta para determinar la localización de rasgos o elementos de un lugar sobre la superficie terrestre, pero además puede proporcionar información sobre tiempo y velocidad de objetos en movimiento, lo que le permite actuar también como un sistema de navegación por radio. Los receptores usan los datos transmitidos para calcular posiciones tridimensionales (latitud, longitud y altitud) de la antena del receptor.

Los satélites transmiten información a los usuarios en tierra, pero no reciben información proveniente de los usuarios; esto significa que los satélites de esta constelación no funcionan como enlace de comunicación entre el usuario y alguna estación base, por ejemplo. También significa que no hay suscripción o cuotas a pagar por el acceso a las señales GPS, y que no existe límite en cuanto al número de usuarios que simultáneamente puedan aprovecharlas.

Los GPS sirven como uno de los medios para introducir datos en los SIG, de una forma segura y con una *alta precisión*, al trabajar con fuentes de datos directas.

Un SIG utiliza una base de datos con atributos sobre características geográficas, por lo que es razonable recoger los datos de atributos al mismo tiempo que son recogidos los datos espaciales.

La entrada de información de atributos a un SIG a través de un receptor GPS debe hacerse por medio de un "diccionario de datos", que no es más que una colección jerárquica de términos

textuales grabados en la memoria de los receptores GPS. Estos términos se clasifican en tres categorías:

- **Tema:** se refiere a la materia de una clase. Si consideramos un ejemplo sobre red de carreteras, el tema podría ser el volumen de tráfico.
- **Atributo:** se refiere a las columnas de la tabla de la base de datos. Continuando con el ejemplo de la red de carreteras, un atributo podría ser los accidentes en el mes de mayo, cada mes podría constituir un atributo distinto.
- **Valor:** se refiere a las entradas actuales en la tabla. En nuestro ejemplo, corresponde al número de accidentes.

### ***2.1.6 El uso de Bases de datos espaciales en SIG***

Para el manejo y gestión de datos geográficos contenidos en un SIG, se hace uso de las bases de datos espaciales. La construcción de una base de datos geográfica o espacial implica un proceso de abstracción; para pasar de la complejidad del mundo real, a una representación simplificada que pueda ser procesada.

Una base de datos espacial, además de contener datos propios de cualquier base de datos (número, textos, fechas, entre otros), contiene información relativa a la localización espacial de elementos geométricos que contienen una forma dada y que ocupan un espacio en un plano bidimensional o tridimensional.

La estructura de las bases de datos espaciales se presenta en capas temáticas. De esta manera se pueden realizar consultas de las características de un objeto (área, largo, ancho, entre otros), y también consultas de las interrelaciones entre objetos (distancia, intersección, contención, adyacencia, entre otros).

Los datos geográficos, presentan la información en representaciones subjetivas a través de mapas y símbolos, que representan la geografía como formas geométricas, redes, superficies, ubicaciones e imágenes, a los cuales se les asignan sus respectivos atributos que los definen y describen.

Un dato espacial es una variable asociada a una localización del espacio. Normalmente se utilizan datos vectoriales, los cuales pueden ser expresados mediante tres tipos de objetos espaciales:

### 1) Puntos

Se encuentran determinados por las coordenadas terrestres medidas por latitud y longitud. Por ejemplo, ciudades en análisis a nivel nacional, accidentes geográficos puntuales.

### 2) Líneas

Objetos abiertos que cubren una distancia dada y comunican varios puntos o nodos, aunque debido a la forma esférica de la tierra también se le consideran como arcos. Líneas telefónicas, carreteras y vías de trenes son ejemplos de líneas geográficas.

### 3) Polígonos

Figuras planas conectadas por distintas líneas u objetos cerrados que cubren un área determinada, como por ejemplo: países, regiones o lagos.

De esta forma la información sobre puntos, líneas y polígonos se almacena como una colección de coordenadas (x, y). La ubicación de una característica puntual, puede describirse con un sólo punto (x, y). Las características lineales, pueden almacenarse como un conjunto de puntos de coordenadas (x, y). Las características poligonales, pueden almacenarse como un circuito cerrado de coordenadas.

La otra forma de expresar datos espaciales es mediante *rasterización*, la cual, a través de una malla permite asociar datos a una imagen; es decir, relaciona paquetes de información con los píxeles de una imagen digitalizada.

Los datos espaciales además, se caracterizan por su naturaleza georreferenciada y multidireccional. La primera se refiere a que la posición relativa o absoluta de cualquier elemento sobre el espacio, contiene información valiosa; pues la localización debe considerarse explícitamente en cualquier análisis. Por multidireccional se entiende que existen relaciones complejas no lineales; es decir, que un elemento cualquiera se relaciona con su vecino y además con regiones lejanas, por lo que la relación entre todos los elementos no es unidireccional. Así, todos los elementos se relacionan entre sí, además de existir una relación más profunda entre los elementos más cercanos (A Baksai *et al.*, 2003).

### **2.1.7 Los Sistemas de Información Geográfica para Transporte (SIG-T)**

A diferencia de los SIG convencionales, los Sistemas de información Geográfica para el Transporte (SIG-T) trabajan en un modelo de red, el cual queda representado en una estructura de arcos y nodos que están estrechamente relacionados. La conectividad entre arcos y nodos contienen información relevante para el análisis de transporte. Entre las aplicaciones destacan el uso para la gestión de flotillas, el monitoreo de unidades en ruta, la administración de unidades para atención de emergencias, los sistemas de información al conductor o al usuario de transporte público, la estimación del flujo de tráfico vehicular, entre otros. (Thill, 2000).

La planificación de rutas es una de las aplicaciones de mayor difusión en el campo SIG-T. Éstos permiten la planificación de viajes y la optimización de rutas por carretera, por ferrocarril, viajes aéreos, bicicleta y transporte público o privado. Incluso facilitan el desarrollo de rutas que combinen distintos modos de transporte, o que traten de optimizar diferentes criterios como tiempo de recorrido, costo económico, valor cultural o ecológico, etc. Los SIG-T permiten tratar de optimizar rutas en ciudades, regiones, países, continentes o a escala global.

Actualmente existen herramientas para trabajar con datos de transporte. TransCAD es un programa que integra un Sistema de Información Geográfica (SIG) con las herramientas de análisis de Transporte. Contiene aplicaciones para módulos de creación de rutas, previsión de la

demanda de viajes, transporte público, logística y gestión del territorio (www.caliper.com/TransCAD).

Por ejemplo, el módulo de análisis de redes de TransCAD, contiene una aplicación para identificar el recorrido más rápido, el más corto o de menor costo; entre un grupo determinado de relaciones origen-destino, con la posibilidad de definir puntos intermedios de tránsito. Los problemas de "ruteo y logística" implican encontrar el recorrido más eficiente de entre un grupo de arcos de la red de transporte. Este módulo tiene múltiples aplicaciones en el sector público y privado, incluyendo las rutas de los vehículos de limpieza de calles, de la recolección de basura, del servicio de correos así como otros servicios puerta a puerta (ver figura 2.3). En un problema típico de ruteo, los vehículos o las personas son enviados desde un depósito o garaje o desde una estación o parada para atravesar un conjunto de puntos de servicios de interés.

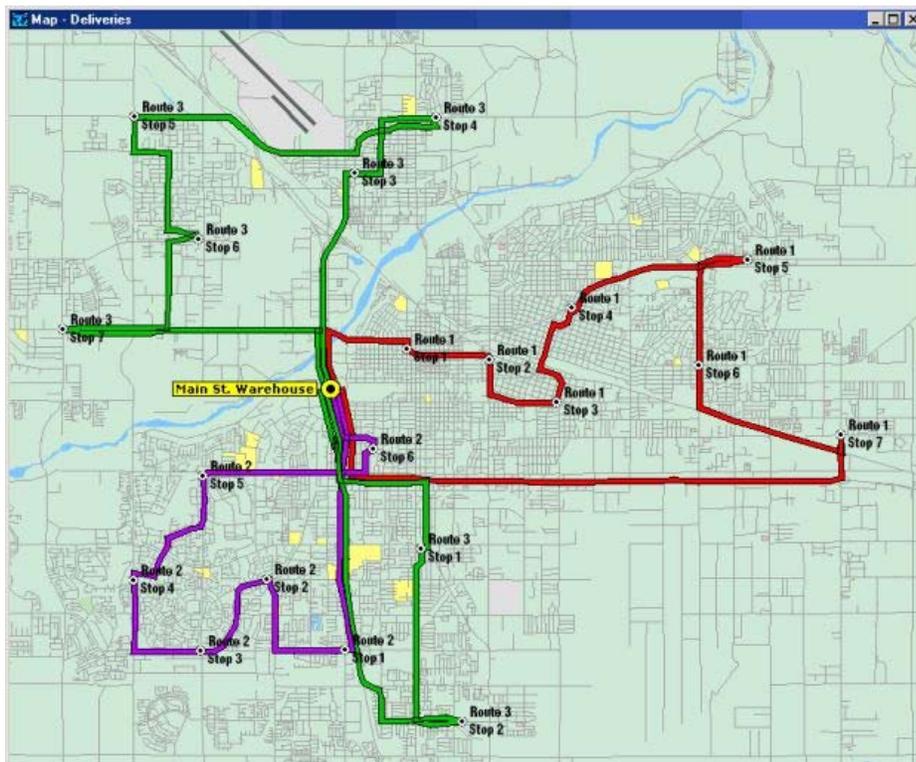


Figura 2.3 Representación de Rutas de Vehículos de Distribución y/o Recolección

Fuente: <http://www.caliper.com/TransCAD/aplicacion.htm>.

El módulo modelos de demanda y planificación del transporte, se utiliza para predecir cambios en los patrones de la movilidad y de la utilización del sistema de transporte; en respuesta a cambios urbanísticos, demográficos y de la oferta de transporte.

## **2.2 Sistemas Inteligentes de Transporte**

Otras de las nuevas tecnologías que el mundo ha experimentado en los últimos 10 años, en el área de transporte, son los Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT o ITS, por sus siglas en inglés). Su objetivo es mejorar la seguridad, eficiencia y confort del transporte, aumentando la funcionalidad de los vehículos y las carreteras usando las tecnologías de la información.

Una definición sencilla de los ITS podría ser la siguiente: “ITS es la aplicación de tecnología avanzada de captura y proceso de información, comunicaciones y control, para mejorar la eficiencia y seguridad en un sistema de transporte (Acha, 2004)”.

### **2.2.1 Tecnologías de transporte inteligente**

A continuación se presenta una descripción, de algunas tecnologías de transporte inteligente mencionadas en la página web del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, de la Universidad Carlos III de Madrid (<http://turan.uc3m.es/uc3m/dpto/IN/dpin04/ISL/STI.html>) y que en algunos países se están implementado como prototipos:

#### **2.2.1.1 Sistema de Alerta ante el Alejamiento Involuntario del Carril**

A través de imágenes tomadas por cámaras, se determina la posición del vehículo respecto a las líneas que marcan los límites del carril. La alarma se dispara cuando la trayectoria del vehículo se aleja de la ideal

El análisis se realiza sobre una imagen que simula una vista aérea de la vía. Esta nueva imagen se obtiene mediante una transformación de perspectiva, lo que exige conocer los parámetros

intrínsecos y extrínsecos del sistema de visión. Por ello se han desarrollado algoritmos de calibración que puedan ejecutarse de forma automática; el conductor sólo tiene que encontrarse en un tramo de carretera recto y pedir al sistema que se autoajuste, sin tener que realizar mediciones previas o introducir los datos iniciales.

Para detectar los límites de la carretera, se ajusta la información proveniente de las cámaras con un modelo. Para ello se buscan zonas de discontinuidad en los niveles de gris de la imagen. Actualmente, los bordes encontrados se ajustan a líneas rectas mediante la transformada de Hough. Se está trabajando en la extensión a otros modelos como parábolas o clotoides.

### **2.2.1.2 Sistema de Reconocimiento de Señales de Tráfico**

La percepción de señales de tráfico es útil para comprobar la velocidad a la que se desplaza un vehículo, así como la prevención ante posibles peligros que puedan aparecer. Para su detección se ha utilizado un modelo geométrico; que tiene en cuenta dos factores: la forma de la señal y su color.

Para encontrar la señal presente en la imagen se han estudiado algoritmos de búsqueda basados en Algoritmos Genéticos.

### **2.2.1.3 Detección de peatones**

Los peatones son el elemento más débil y desprotegido de entre todos los que circulan por las calles y carreteras. Sólo en el caso del autotransporte carretero en México, de acuerdo con cifras de la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST, 1999), de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), en 1998 se registraron 56,319 accidentes (carreteras de jurisdicción federal), con un saldo de 4,566 personas fallecidas, 31,129 heridas y daños materiales por un monto de 1,133.387 millones de pesos. A las cifras anteriores habría que agregar las correspondientes a carreteras de jurisdicción estatal, y aquellas de los ocurridos en

vialidades urbanas. Las cifras mostradas dan una idea de lo importante que resultaría, el abatir la cantidad de accidentes y su severidad si se contara con los medios para hacerlo.

El sistema de detección debe indicar al conductor la presencia de posibles colisiones. Para ello el sistema no sólo debe detectar a todos los peatones que rodean al vehículo, sino analizar su actividad y movimiento para determinar aquéllos con los que pueda existir un conflicto.

Debido a la enorme diversidad en la apariencia de los peatones y los cambios en la forma de éstos entre imágenes sucesivas, se ha procedido a desarrollar un algoritmo basado en los contornos activos. Para inicializarlos se utilizan los resultados de un sistema estéreo y además se tiene en cuenta la simetría que guarda la forma de los peatones.

#### ***2.2.1.4 Control de Velocidad Variable***

El sistema reconoce los vehículos que lo preceden y calcula su velocidad y trayectoria determinando la velocidad máxima a la que puede desplazarse, para no correr ningún peligro manteniendo una distancia de seguridad.

Reconocer vehículos mediante análisis de imágenes tiene como mayor dificultad la gran diversidad de apariencia que pueden tener estos objetos, debido a los diversos modelos y marcas o a la perspectiva con respecto a la cámara. Para ello se ha diseñado un modelo geométrico de siete grados de libertad y que representa a un vehículo genérico. Para determinar lo bien que se ajusta un modelo concreto a la imagen se obtienen los bordes de ella, la distancia a ellos y su simetría, estableciéndose una formulación que mide el grado de adecuación. Dado que el espacio de parámetros es muy grande, se han desarrollado los mecanismos de búsqueda utilizando algoritmos genéticos.

#### ***2.2.1.5 Sistema de Control del Conductor***

Recientemente está recibiendo atención la percepción del entorno interior del vehículo, o ya que se pueden desarrollar varios Sistemas de Ayuda a la Conducción. El más inmediato es el que supervisa el estado de atención del conductor para detectar, por ejemplo, si se está durmiendo.

Esto puede hacerse midiendo el parpadeo de los ojos, el movimiento de la cabeza, la apertura de la boca. Sistemas posteriores determinarán si el conductor está prestando la suficiente atención a la conducción y le avisarán en caso contrario.

Hasta ahora, la mayor parte de estos sistemas se han implementado en los Estados Unidos, Europa y Japón, al menos como prototipos. Algunas tecnologías, tales como peajes electrónicos, pesaje dinámico de camiones y semáforos computarizados; ya existen en América Latina, donde la infraestructura en desarrollo permite que estos sistemas sean considerados desde un principio, bajo un proceso de planificación predeterminado. Además, el crecimiento económico y el libre comercio entre países han creado la necesidad de optimizar el transporte terrestre.

Las ventajas que ofrecen los SIT para mejorar la operación de un sistema de transporte, lo hacen muy atractivo para los responsables de su operación. Sin embargo, las pocas aplicaciones que se han desarrollado en México, carecen de un marco común que las haga más útiles. Esta carencia provoca que el equipo resulte obsoleto en poco tiempo y que presente problemas de compatibilidad.

### ***2.2.1.6 Sistema de Información al viajero***

La información previa al viaje tiene como objetivo construir un entorno vial/carretero seguro y agradable para conductores, peatones y usuarios de los sistemas de transporte. Tal información permite asistir a los viajeros en la toma de decisiones del viaje, efectuar estimaciones de tiempo de viaje y decisiones de ruta previas al inicio del viaje. A continuación se enlistan cuatro funciones fundamentales de los sistemas de información al viajero, al igual que la selección de rutas, proporcionados por el documento “Hacia una Arquitectura Nacional para los Sistemas Inteligentes de Transporte” (Acha, 1999):

1. **Información de servicios disponibles.** La Información de servicios disponibles incluye información programada de rutas de transporte público, horarios de transporte público, información complementaria de horarios, opciones de transbordo, tarifas, servicio de viajes compartidos.

2. **Información de la situación actual.** Incluye el estado vigente de los servicios de transporte, condición actual de incidentes, accidentes, construcción/mantenimiento de vialidades, rutas alternas, velocidades en rutas específicas, condiciones de estacionamiento en áreas clave, horarios de eventos próximos o actuales, condiciones climáticas.
  
3. **Servicio de planeación de viaje.** El servicio de planeación de viaje basado en parámetros específicos del usuario, incluye las necesidades de información para planear un viaje próximo, itinerario estimado, selección modal, condiciones de viaje en tiempo real; además de proporcionar al usuario la capacidad de elegir las mejores condiciones de viaje según sus necesidades y preferencias específicas tanto de horarios, comodidad y condiciones climáticas, mediante itinerarios alternos a un primer itinerario.

Los usuarios podrán especificar un destino deseado, una ubicación de salida planeada, la hora de salida deseada, la hora de llegada deseada, sus rutas o segmentos de rutas preferidas, sus modos de transporte preferidos y las condiciones climáticas preferidas. También, se considerarán las condiciones actuales y previstas de viaje al calcular un itinerario de viaje.

4. **Acceso al usuario.** El Acceso al usuario permite que los usuarios tengan acceso al sistema desde múltiples ubicaciones, desde sus hogares, su lugar de trabajo, sitios generadores de viajes, dispositivos personales portátiles, y a través de varios tipos de medios electrónicos. Los medios de acceso deben cumplir con la legislación establecida para el caso.
  
5. **Selección de rutas.** Este servicio proporciona al usuario instrucciones acerca de las vueltas que debe realizar y otras maniobras para llegar a los destinos seleccionados. De manera simple, un usuario introduce un destino y será provisto de una ruta fija recomendada. De forma más dinámica, el usuario recibirá instrucciones seleccionadas en

el curso del viaje al destino. Puede incluir información que tome en consideración las condiciones del tránsito.

Este servicio deberá incluir una función de guiado de ruta (RG por sus siglas en inglés, Route Guidance), que ayudará al viajero con instrucciones para destinos seleccionados. Consiste de cuatro funciones: 1) proveer instrucciones, 2) modo estático, 3) modo tiempo real, y 4) interface con el usuario.

1. La RG habrá de incluir la capacidad de proporcionar instrucciones a los viajeros para la ubicación de destinos seleccionados. Esta función debe emitir instrucciones con base en información de las condiciones actuales de los sistemas de transporte. La información actualizada de las condiciones del sistema de transporte, con base en la cual se dan instrucciones a los viajeros, debe incluir:
  - Condiciones actuales del tránsito
  - Estatus de los sistemas de transporte público
  - Horarios de los sistemas de transporte público
  - Eventos que influyen las rutas de viaje
  - Calles cerradas
  
2. La RG deberá incluir un modo estático para la difusión de información a los viajeros. El modo estático emitirá a los viajeros información en mapas de caminos e información de horarios de los sistemas de transporte público. El modo estático debe contar con comunicaciones en dos sentidos entre el viajero y la infraestructura. Este tipo de comunicaciones da la capacidad para captar el destino deseado del viajero, y proporcionar instrucciones al viajero basadas en la ruta calculada por la infraestructura.
  
3. La RG incluirá un modo en tiempo real, que utilice información actualizada de las condiciones de viaje para proporcionar la información siguiente, con mejor desempeño que el modo estático: información de condiciones de tránsito e información dinámica de

horarios de tránsito. El modo en tiempo real incluye la capacidad de operar con procesadores de selección de ruta ubicados en unidad móvil, o en procesadores de selección de ruta instalados en la infraestructura del sistema de transporte, o en ambos.

Este tipo de sistemas basado en equipos móviles, debe comprender la capacidad de recibir información de la infraestructura y usarla para la determinación de rutas. En este caso, el sistema se denotará como un sistema de tiempo real basado en infraestructura. El modo en tiempo real deberá brindar la capacidad para la operación autónoma de los sistemas de base móvil.

4. La RG tendrá que incluir una función de interface con el usuario, que proporcione la capacidad para que los viajeros tengan acceso al sistema mediante el uso de dispositivos interactivos, que incluyen:

- Visualización [display]
- Teclados [keypads]
- Dispositivos sensibles al contacto [touch devices]
- Voz generada por computadora
- Sistema de reconocimiento de voz

### ***2.2.2 Una arquitectura ITS para México***

Consciente de la importancia de la aplicación de las nuevas tecnologías en el transporte del país, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes han desarrollado, desde hace poco más de 10 años, una línea de investigación sobre los ITS, en el proyecto “Arquitectura ITS para México” (Acha, 1999), cuyo resultado es el siguiente:

Para tener un impacto notorio en la capacidad de los sistemas de transporte terrestre, la construcción de infraestructura requiere fuertes gastos. Sin embargo, el incremento en la capacidad del sistema vial así logrado es, en un plazo no muy largo, superado por el aumento en

la demanda. Como consecuencia, los caminos aparecen de nueva cuenta congestionados, requiriéndose de nuevas ampliaciones.

Las medidas para el control de la demanda son generalmente menos costosas. Éstas buscan reducir la cantidad de usuarios que circulan en las redes de caminos, o redistribuirlos espacial y/o temporalmente para de esa forma, reducir los niveles de congestionamiento, vía un uso más eficiente de las redes viales.

El estudio se realizó de acuerdo a una comparación de las arquitecturas de ITS de algunos países, tales como: EU, Japón, Canadá y Europa. Las conclusiones que se obtuvieron del análisis fueron que para desarrollar una arquitectura ITS para México se deberán definir las funciones que deben llevarse a cabo para implantar un servicio al usuario (por ejemplo, solicitar una ruta para llegar a un destino o información de tránsito en una ciudad), el equipo o entidades físicas en donde se llevarán a cabo estas funciones (por ejemplo, el automóvil o dispositivos a un lado de las carreteras), los flujos de información e interfaces entre los diferentes componentes físicos y los requerimientos de comunicación para que los flujos de información puedan realizarse (comunicaciones por cable o inalámbricas). Además, definir los estándares necesarios para lograr la interoperabilidad a nivel regional, nacional e incluso internacional.

De acuerdo al estudio mencionado, para seleccionar los servicios al usuario por orden de importancia se tomaron los siguientes criterios: a) **Existencia de antecedente**. En el que se señala si se tiene o no conocimiento de un servicio similar que se esté ofreciendo en México. b) **Necesidad**. Con este criterio se establece si se considera que el servicio es necesario. c) **Complejidad tecnológica**. Considera el grado de complejidad tecnológica que implica la implantación del servicio. d) **Complejidad de instrumentación**. Comprende el grado de involucramiento necesario por parte de los distintos actores para la implantación del servicio y las dificultades asociadas para la coordinación de esos actores. e) **Beneficio**. Identifica hacia quién estará orientado el beneficio de la implantación del servicio. f) **Costo total**. Establece el orden de magnitud del costo de la implantación del servicio. g) **Tiempo de implantación**. Estima el tiempo necesario para lograr la instalación y puesta en operación de los componentes del servicio.

En la siguiente tabla 2.2 se muestra un resumen de los servicios al usuario que se propone sean ofrecidos por los ITS en México en corto y mediano plazo.

**Resumen de los servicios al usuario propuestos por los ITS de México**

<b>Servicios al usuario</b>	<b>Paquete de servicios</b>
Apoyo al viajero	Información previa al viaje (peatones, conductores). Selección de rutas. Información de servicios al viajero.
Servicios centrales	Control de tránsito. Administración de la demanda de viajes. Administración del transporte público. Seguridad para el usuario del transporte público. Operaciones y mantenimiento.
Administración de vehículos de carga	Procesos de administración de vehículos de carga. Administración de carga intermodal.
Administración de emergencias	Administración de incidentes y desastres. Respuesta a incidentes con materiales peligrosos.
Carretera	Mejoras de seguridad basada en sensores Activación de restricciones al movimiento antes de impacto.

**Tabla 2.2** Resumen de los servicios al usuario de la arquitectura ITS México

Fuente: Acha, 1999

## **CAPÍTULO 3**

# **EL PROBLEMA DE LA RUTA MÍNIMA EN LAS REDES DE TRANSPORTE**

En este capítulo se describe una de las aplicaciones más interesantes en el campo de transporte, que es encontrar la ruta más corta entre dos puntos dados en el espacio. Éste es un subproblema de muchos problemas de transporte, entre los que se encuentran los de estimación o asignación de flujos en una red. Muchas actividades de transporte como la entrega de pedidos y la distribución de mercancías, que se dan a diario en una ciudad, buscan optimizar recursos, tales como tiempo y costos. En este caso, el problema de la ruta mínima busca obtener la ruta de mínima distancia, de mínimo tiempo o costo (como función de la distancia).

La representación de la red vial ZMVM fue realizada mediante teoría de grafos, como conjuntos de nodos y de arcos con sus respectivos atributos (sentido de circulación, número de carriles, etc).

Los aspectos que se tomaron en cuenta para seleccionar un algoritmo de ruta mínima fueron su sencillez y su facilidad de implementación (número de operaciones y tipo de operaciones utilizadas en la implementación, así como el tipo de recursos de hardware y software), ya que un algoritmo difícil de implementar requiere desarrolladores especializados, un mayor tiempo de desarrollo, un costo más alto de mantenimiento en el futuro y tiene un alto riesgo de que la implementación contenga errores. Además, un algoritmo complicado no es fácil de modificar cuando el problema cambia.

En este trabajo, el algoritmo de ruta mínima seleccionado fue Dijkstra. Los criterios que se tomaron en cuenta para su selección fue la complejidad computacional y las características de la red. Desde el punto de vista computacional fueron: la viabilidad de su implementación computacional, requerimientos de tiempo en el desarrollo, interés práctico y teórico, así como

eficiencia práctica demostrada en estudios anteriores realizados por investigadores en el área. En cuanto a las características de la red (red vial de la ZMVM), que se detallarán en el siguiente capítulo, se puede describir como un grafo disperso, conexo y direccional, donde cada arco posee una longitud no negativa. Tales características se adaptan al algoritmo seleccionado.

### **3.1 Grafos**

Existen una gran cantidad de problemas de la vida cotidiana que se pueden formular en términos de grafos. Por ejemplo, se puede representar mediante un grafo una serie de tareas a realizar indicando su secuenciación, una red de carreteras, la red de enlaces ferroviarios o aéreos o la red electrónica de una ciudad. En cada caso suele ser conveniente representar un problema de manera gráfica.

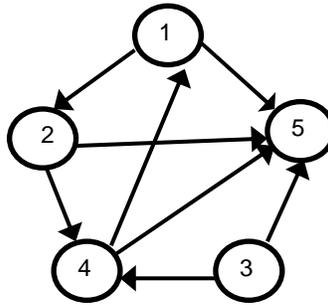
#### **3.1.1 Definición**

El origen de la palabra grafo es griego y su significado etimológico es trazar. La definición de un grafo encontrada en casi todos los libros es la siguiente: “Un grafo  $G$  es una pareja ordenada  $G(N, A)$ , (G. Brassard, 1997)”. Ver figura 3.1.

**Donde:**

$N$  es un conjunto finito de vértices (nodos, en redes de transporte).

$A$  es un conjunto de parejas de distintos vértices, entre los cuales se trazan líneas llamadas aristas (arcos, en redes de transporte).



**Figura 3.1** Ejemplo de un grafo dirigido.

En las siguientes secciones se hace referencia a arcos y nodos, ya que en el análisis de redes de transporte se manejan estos términos.

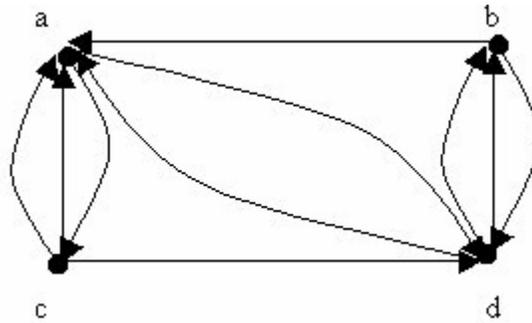
### **Grafos simples**

Un grafo simple  $G(N, A)$ , consta de  $N$ , un conjunto no vacío de nodos, y de  $A$ , un conjunto de pares no ordenados de elementos distintos de  $N$ .

En algunos casos los grafos simples no bastan para modelar ciertas situaciones, en las cuales se requiere de la existencia de múltiples arcos entre un par de nodos. En este caso no es suficiente definir los arcos como pares de nodos; la definición de multigrafo es un poco más complicada.

### **Multigrafo**

Un multigrafo  $G(N, A)$  consta de un conjunto  $N$  de nodos, un conjunto  $A$  de arcos y una función  $f$  de  $A$  en  $\{\{u, v\} | u, v \in N, u \neq v\}$ . Geométricamente puede representarse como un conjunto  $N$  de nodos y un conjunto  $A$  de arcos entre los nodos, donde no existe restricción en el número de arcos de un nodo a otro. Ver figura 3.3. Los multígrafos definidos no admiten bucles o lazos (arcos que conectan un nodo consigo mismo).

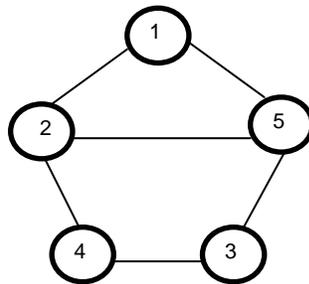


**Figura 3.3** Multigrafo dirigido

Los grafos son estructuras de datos no lineales que tiene una naturaleza generalmente dinámica. Para un mejor estudio de los grafos, se dividen en grafos dirigidos y no dirigidos, cuyas características se presentan a continuación.

### 3.1.2 Grafos no dirigidos

- Los nodos están unidos mediante arcos sin indicación de dirección (pueden ser considerados como un caso particular de grafos dirigidos).
- Para grafos simples nunca hay más de un arco que una a dos nodos dados. Ver figura 3.4.



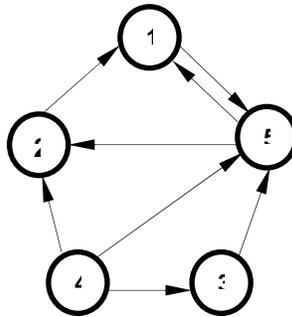
$$N = \{1, 2, 3, 4, 5\}$$

$$A = \{\{1, 2\}, \{2, 1\}, \{2, 5\}, \{5, 2\}, \{1, 5\}, \{5, 1\}, \{2, 4\}, \{4, 2\}, \{3, 4\}, \{4, 3\}, \{3, 5\}, \{5, 3\}\}$$

**Figura 3.4** Grafo no dirigido simple

### 3.1.3 Grafos dirigidos

- Los nodos están unidos mediante flechas llamadas arcos.
- Para grafos simples, nunca hay más de dos arcos que unan dos nodos dados, y si los hubiera, entonces tendrían que ir en sentidos opuestos, como se muestra en la figura 3.5.
- Se permite circular en sentido inverso a lo largo de los arcos.



$$N = \{1, 2, 3, 4, 5\}$$

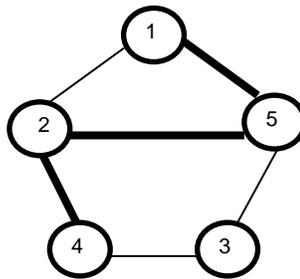
$$A = \{(1, 5), (2, 1), (3, 5), (4, 2), (4, 5), (4, 3), (5, 1), (5, 2)\}$$

Figura 3.5 Grafo dirigido simple

### 3.1.4 Definiciones y terminología fundamental de grafos

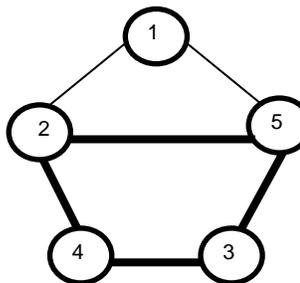
Las siguientes definiciones fueron retomadas del libro Fundamentos de Algoritmia (Brassard, 1997).

- Ruta** es una secuencia de arcos que en el extremo final de cada arco coincide con el extremo inicial del siguiente en la secuencia, sin repetir arcos y nodos, de lo contrario formaría un ciclo. Ver figura 3.6.



**Figura 3.6** La ruta está formada por las líneas más gruesas

- b) Un **ciclo** es un camino cerrado, figura 3.7.



**Figura 3.7** El ciclo está formado por las líneas más gruesas

- c) **Grafo ponderado.** Tanto a los arcos como a los nodos se les puede asociar información. A esta información se le llama etiqueta, la cual es un número que puede representar peso, costo o longitud. Un grafo cuyos arcos o nodos tienen pesos asociados, recibe el nombre de **grafo etiquetado o ponderado**.
- d) La **longitud de la ruta** es el número de arcos que comprende; en caso de un grafo ponderado, se calcula como la suma de los pesos de los arcos que la constituyen.
- e) Un grafo es **conexo** si se puede llegar desde cualquier nodo hasta cualquier otro siguiendo una secuencia de arcos.

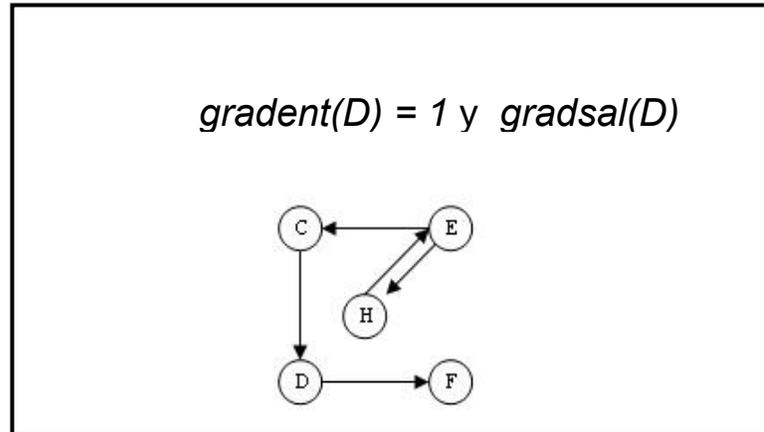
- f) Un grafo es **fuertemente conexo** si se puede pasar desde cualquier nodo hasta cualquier otro siguiendo una secuencia de arcos, pero respetando esta vez el sentido de los arcos.
- g) **Grafo denso** es aquel que tiene un gran número de arcos  $A$ , cercano al número de nodos,  $N$ , al cuadrado.
- h) **Grafo disperso** es aquel en que el número de arcos  $A$  es pequeño  $A \ll N$ .
- i) Según el número de arcos que contiene, un grafo es **completo** si cuenta con todos los arcos posibles (es decir, todos los nodos están conectados con todos).

El número de distintos pares de nodos  $(v(i), v(j))$ , con  $v(i) \neq v(j)$ , en un grafo con  $n$  nodos es  $n*(n-1)/2$ , el cual corresponde al número máximo de arcos en un grafo no dirigido de  $n$  nodos. Un grafo no dirigido que tenga exactamente  $n*(n-1)/2$  arcos se dice que es un grafo completo. En el caso de un grafo dirigido de  $n$  nodos, el número máximo de arcos es  $n*(n-1)$ .

### 3.1.5 Grado de un grafo

El grado de un nodo es el número de arcos conectados a él (número de nodos adyacentes).

- En un grafo no dirigido, el grado de un nodo  $n$ ,  $grado(n)$  es el número de arcos incidentes a  $n$ .
- En un grafo dirigido se distingue entre grado de entrada y grado de salida: *grado de entrada* de un nodo  $n$ ,  $gradent(n)$ , es el número de arcos que llegan a  $n$ ; *grado de salida* de  $n$ ,  $gradsal(n)$ , es el número de arcos que salen de  $n$ . En un grafo dirigido los arcos son pares ordenados. Implica que  $(n1, n2) \neq (n2, n1)$ . Ver figura 3.8



**Figura 3.8** Grado de entrada y salida de un nodo en un grafo dirigido.

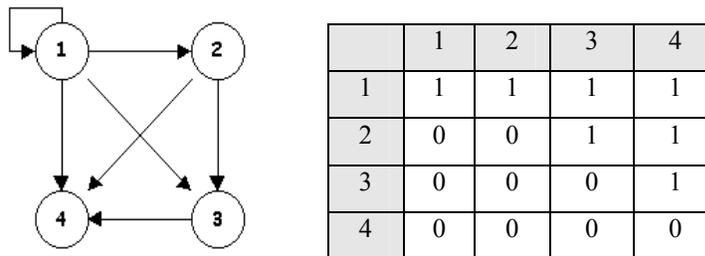
### 3.1.6 Representaciones de un grafo en memoria

Básicamente existen dos representaciones en memoria para un grafo, Matriz de adyacencia (o booleana) y Lista de adyacencia.

#### Matriz de adyacencia

Un grafo se puede representar mediante una matriz  $A$  tal que  $A[i,j]=1$ , si hay un arco que conecta  $i$  con  $j$ , y 0 si no, figura 3.9.

La matriz de adyacencia de un grafo no dirigido es simétrica, para un grafo dirigido es asimétrica.



**Figura 3.9** Matriz de adyacencia para un grafo dirigido

En esta implementación, cada problema tendrá una forma de entrada distinta y la inicialización será conveniente adaptarla a cada situación. En todo caso, esta operación es sencilla si el número de nodos es pequeño. Si, por el contrario, la entrada fuese muy grande se pueden almacenar los nombres de nodos en un árbol binario de búsqueda o utilizar una tabla de dispersión, asignando un entero a cada nodo, que será el utilizado en la matriz de adyacencia.

La matriz de adyacencia siempre ocupa un espacio de  $N*N$ , es decir, depende solamente del número de nodos y no del de arcos, por lo que será útil para representar grafos densos. A continuación se enlistan los inconvenientes al utilizar dicha implementación (Thomas H, 2003):

- Es una representación orientada hacia grafos que no modifican el número de sus nodos, ya que una matriz no permite que se le supriman filas o columnas.
- Se puede producir un gran derroche de memoria en grafos poco densos (con gran número de nodos y escaso número de arcos).
- Desperdicia una gran cantidad de espacio si el grafo no es completo. Requieren  $O(n^2)$  bits de memoria.
- Se requiere tiempo  $O(n)$  para encontrar la lista de vecinos de un nodo dado.

### **Lista de adyacencia**

En esta estructura de datos, la idea es asociar a cada nodo  $i$  del grafo una lista que contenga todos aquellos nodos  $j$  que sean adyacentes a él. De esta forma sólo reservará memoria para los arcos adyacentes a  $i$  y no para todos los posibles arcos que pudieran tener como origen  $i$ . El grafo, por tanto, se representa por medio de un vector de  $n$  componentes donde cada componente va a ser una lista de adyacencia correspondiente a cada uno de los nodos del grafo. Cada elemento de la lista consta de un campo indicando el nodo adyacente. En caso de que el grafo sea etiquetado, habrá que añadir un segundo campo para mostrar el valor de la etiqueta. En las figuras 3.10 y 3.11 se muestra la representación de un grafo en lista de adyacencia (Thomas H, 2003).

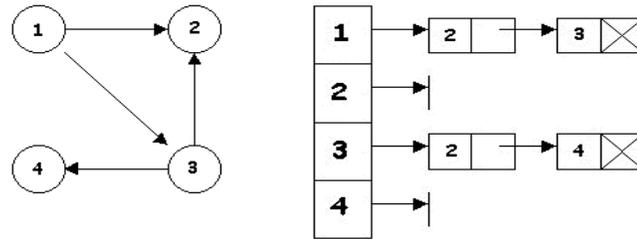


Figura 3.10 Lista de adyacencia para un grafo dirigido

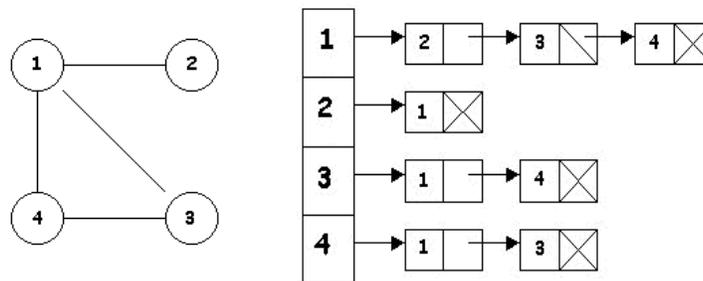


Figura 3.11 Lista de adyacencia para un grafo no dirigido

Esta representación requiere un espacio proporcional a la suma del número de nodos, más el número de arcos, y se suele usar cuando el número de arcos es mucho menor que el número de arcos de un grafo completo.

- Se pueden añadir y suprimir arcos sin desperdicio de memoria, ya que simplemente habrá que modificar la lista para reflejar los cambios.
- Una desventaja es que puede llevar un tiempo  $O(n)$  determinar si existe un arco del nodo  $i$  al nodo  $j$ , ya que puede haber  $n$  nodos en la lista de adyacencia asociada al nodo  $i$ . Tampoco es tan eficiente para encontrar si existe un arco entre dos nodos determinados.

También existen otras representaciones eficientes, como filas, pilas, colas dobles, heaps, buckets, etc. Por ejemplo, en muchos casos es necesario ordenar los arcos de un grafo ponderado de acuerdo a su peso. Ante tal situación es apropiado definir una estructura que contenga la información de los arcos (se pueden almacenar en listas ligadas) y luego insertarlas en una cola

de prioridad. Para eliminar la recursión en la búsqueda del siguiente nodo se utilizan pilas. La implementación con heaps es ideal para hallar el mayor de los elementos del conjunto de nodos. La implementación con buckets busca postergar el ordenamiento de los nodos almacenados en una lista doblemente ligada hasta el momento en que van a ser extraídos de ella. Una lista doblemente ligada requiere  $O(1)$  de tiempo para completar una operación cada vez que actualice la distancia en la estructura de datos bucket.

### 3.1.7 Recorridos de grafos

En muchas aplicaciones es necesario visitar todos los nodos del grafo a partir de un nodo dado. Algunas aplicaciones son:

- Encontrar ciclos
- Encontrar componentes conexas
- Encontrar árboles de cobertura <sup>1</sup>

Hay dos enfoques básicos para recorrer los vértices de un grafo:

- **Recorrido (o búsqueda) en profundidad (depth-first search):** La idea es alejarse lo mas posible del nodo inicial (sin repetir nodos), luego devolverse un paso e intentar lo mismo por otro camino.
- **Recorrido (o búsqueda) en amplitud (breadth-first search):** Se visita a todos los nodos vecinos directos del nodo inicial, luego a los vecinos de los vecinos, etc. Se usa para aquellos algoritmos en donde resulta crítico elegir el mejor camino posible en cada momento como sucede en Dijkstra.

---

<sup>1</sup> Dado un grafo  $G$  no dirigido, conexo, se dice que un subgrafo  $T$  de  $G$ , es un árbol de cobertura si es un árbol y contiene el mismo conjunto de nodos que  $G$ , donde un árbol es un grafo acíclico, conexo y no dirigido.

---

### **3.2 Algoritmo de Dijkstra para encontrar la ruta mínima en un grafo dirigido**

El algoritmo de Dijkstra se aplica para un grafo  $G(N, A)$  dirigido y conexo, donde cada arco posee una longitud no negativa. Posee la característica de ser un algoritmo del tipo voraz (greedy).

Los algoritmos voraces suelen ser los más fáciles de las familias de los algoritmos. El nombre voraz proviene de que, en cada paso, el algoritmo escoge el mejor "pedazo" que es capaz de "comer".

El enfoque que aplican es miope, y toman decisiones basándose en la información que tienen disponible de modo inmediato, sin tener en cuenta los efectos que estas decisiones puedan tener en el futuro. Por tanto resultan fáciles de inventar, fáciles de implementar y, cuando funcionan, son eficientes. Las características generales de este tipo de algoritmos son las siguientes:

- Inicialmente se dispone de un conjunto de candidatos.
- A medida que avanza el algoritmo, se van acumulando dos conjuntos. Uno contiene candidatos que ya han sido considerados y seleccionados, mientras que el otro contiene candidatos que han sido considerados y rechazados.
- Existe una función que comprueba si un cierto conjunto de candidatos constituye una solución al problema, ignorando si es o no es óptima por el momento.
- Hay una segunda función que comprueba si un cierto conjunto de candidatos es factible, esto es, si es posible o no completar el conjunto añadiendo otro candidato para obtener al menos una solución del problema.

- Hay otra función más, la función de selección, que indica en cualquier momento cuál es el más prometedor de los candidatos restantes, que no han sido seleccionados ni rechazados.
- Por último, existe una función objetivo que da el valor de la solución al problema.

El algoritmo de Dijkstra utiliza dos conjuntos de nodos,  $S$  y  $C$ . En todo momento, el conjunto  $S$  contiene aquellos nodos que ya han sido seleccionados; la distancia mínima desde el origen ya es conocida para todos los nodos de  $S$ .

El conjunto  $C$  contiene todos los demás nodos, cuya distancia mínima desde el origen todavía no es conocida, y que son candidatos a ser seleccionados en alguna etapa posterior. Por tanto se tiene la propiedad invariante  $N = S \cup C$ .

En un primer momento,  $S$  contiene nada más al origen; cuando se detiene el algoritmo,  $S$  contiene a todos los nodos del grafo y el problema está resuelto. En cada paso se selecciona aquel nodo de  $C$  cuya distancia al origen sea mínima, y se le añade a  $S$ .

Se establece que una ruta desde el origen hasta algún otro nodo es especial, si todos los nodos intermediarios a lo largo de la ruta pertenecen a  $S$ . En cada fase del algoritmo, hay una matriz  $D$  que contiene la longitud de la ruta especial más corta que va hasta cada nodo del grafo.

En el momento en que se desea agregar un nuevo nodo  $v$  a  $S$ , la ruta especial más corta hasta  $v$  es también la ruta más corta de las rutas posibles hasta  $v$ .

Cuando se detiene el algoritmo, todos los nodos del grafo se encuentran en  $S$ , y por tanto todas las rutas desde el origen hasta algún otro nodo son especiales. Los valores que hay en la matriz  $D$  dan la solución del problema de la ruta mínima.

Claramente,  $D$  no cambiaría si se hiciera una iteración más para eliminar el último elemento de  $C$ . Ésta es la razón por la cual el bucle principal se repite solamente  $n-2$  veces. El Algoritmo de Dijkstra se muestra en la Figura 3.12.

### **Algoritmo Dijkstra**

```
Función Dijkstra ( $L[1..n, 1..n]$ ): matriz $[2..n]$   
matriz  $D[2..n]$   
{Iniciación}  
 $C \leftarrow \{2,3,\dots,n\}$  { $S = N \setminus C$  sólo existe implícitamente}  
para  $i \leftarrow$  hasta  $n$  hacer  $D[i] L[1,i]$   
  {bucle voraz}  
  repetir  $n-2$  veces  
     $v \leftarrow$  algún elemento de  $C$  que minimiza  $D[v]$   
     $C \leftarrow C \setminus \{v\}$  {e implícitamente  $S \leftarrow S \cup \{v\}$ }  
    para cada  $\omega \in C$  hacer  
       $D[\omega] \leftarrow \min(D[\omega], D[v] + L[v, \omega])$   
    devolver  $D$ 
```

**Figura 3.12** Pseudocódigo del algoritmo Dijkstra

Fuente: Thomas H, 2003.

### 3.2.1 Análisis de complejidad del algoritmo de Dijkstra

El análisis de complejidad computacional que se hace al algoritmo de Dijkstra fue retomado de Brassard y Thomas (2003).

Suponiendo que el algoritmo Dijkstra se aplica a un grafo que posee  $n$  nodos y  $a$  arcos. Utilizando la representación sugerida hasta el momento, este caso se da en la forma de una matriz  $L[1..n, 1..n]$ . La iniciación requiere un tiempo que está en  $O(n)$ . En una implementación directa, la selección de  $v$  dentro del bucle (**repetir**) requiere examinar los elementos de  $C$ , así que se examinarán  $n-1, n-2, \dots, 2$  valores de  $D$  en las sucesivas iteraciones, dando un tiempo total que está en  $\Theta(n^2)$ . El bucle **para (desde)** interno realiza  $n-2, n-3, \dots, 1$  iteraciones dando un tiempo total que está en  $\Theta(n^2)$ .

Si  $a \ll n^2$ , se podrían evitar las muchas entradas que contienen  $\infty$  en la matriz  $L$ . Teniendo esto en cuenta es preferible representar el grafo mediante una matriz de  $n$  listas, que dé para cada nodo su distancia directa a los nodos adyacentes. Con esto se logra ahorrar tiempo en el bucle **para** interno, porque sólo hay que considerar aquellos nodos  $w$  que sean adyacentes a  $v$ . Ahora bien, para evitar que se necesite un tiempo en  $\Omega(n^2)$  para determinar sucesivamente los  $n-2$  valores que va tomando  $v$ , se necesita utilizar un montículo (heap) invertido que contenga un nodo para cada elemento  $v$  de  $C$ , ordenado por el valor de  $D[v]$ . De esta manera, el elemento  $v$  de  $C$  que minimiza  $D[v]$  siempre se encontrará en la raíz. La iniciación del montículo requiere un tiempo que está en  $\Theta(n)$ . La instrucción  $C \leftarrow C \setminus \{v\}$  consiste en eliminar la raíz del montículo, lo cual requiere un tiempo que se encuentra en  $O(\log n)$ . En cuanto al bucle **para** interno, ahora consiste en verificar, para cada elemento  $w$  de  $C$  adyacente a  $v$ , si  $D[v] + L[v, w]$  es menor que  $D[w]$ . En tal caso, se debe modificar  $D[w]$  y filtrar a  $w$  dentro del montículo, lo cual requiere una vez más un tiempo que está en  $O(\log n)$ . Esto no sucede más que una vez para cada arco del grafo.

Resumiendo, se tiene que eliminar la raíz del montículo exactamente  $n-2$  veces, y subir un máximo de  $n$  nodos, lo cual da un tiempo total que está en  $\Theta((a + n) \log n)$ . Si el grafo es conexo,  $a \geq n - 1$ , y el tiempo se encuentra en  $\Theta(a \log n)$ .

La implementación general de Dijkstra es preferible, por tanto si el grafo es disperso, mientras que resulta preferible utilizar un montículo si el grafo es denso. Sin embargo, la construcción de un montículo requiere un trabajo de mayor complejidad, lo que hace que el algoritmo no sea fácil de implementar.

Existe una propuesta por parte de unos investigadores para mejorar el algoritmo de Dijkstra, que evitan el proceso de construcción del montículo, lo cual resulta ser muy competitivo para aquellas redes dispersas, especialmente en las redes de tráfico donde el número máximo incidente en cada nodo resulta ser frecuentemente muy pequeño. Tales propuestas quedan fuera del alcance de los objetivos de este trabajo, pero es importante mencionarlas para futuras modificaciones a la implementación (M.H.Xu *et al.*, 2006).

## **CAPÍTULO 4**

### **IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE DIJKSTRA EN LA RED VIAL DE TRANSPORTE DE CARGA DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO**

En este capítulo se presenta la implementación del algoritmo Dijkstra para encontrar la ruta mínima (distancia más corta) dados dos puntos (origen y destino), en la red vial de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) del Sistema de Información Geográfica de Transporte de Carga (SIG-TC) del Laboratorio de Transportes y Sistemas Territoriales (LTST).

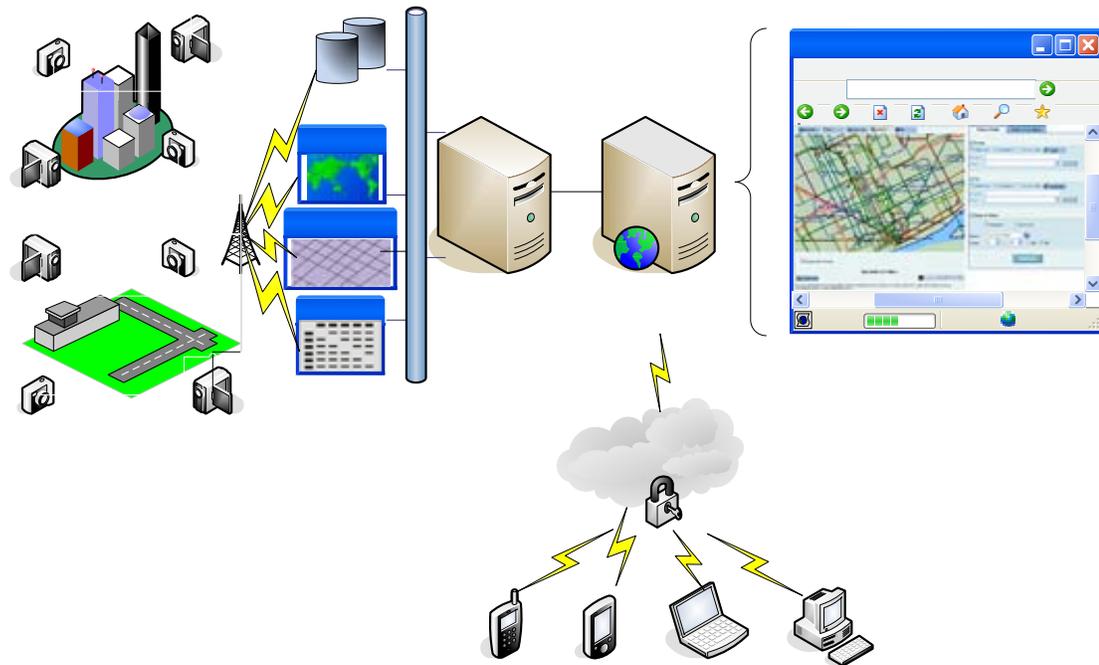
#### **4.1 Contexto en el que se desarrolla la implementación del algoritmo Dijkstra**

El Sistema de Información Geográfica para el Transporte de Carga (SIG-TC) fue desarrollado en el Laboratorio de Transporte y Sistemas Territoriales (LTST) del Instituto de Ingeniería-UNAM (en el 2006), con base en TransCAD, una herramienta SIG especializada en transporte.

Uno de sus módulos de aplicación del SIG-TC es la identificación de la ruta más corta entre pares de nodos, origen y destino, sobre la red vial principal de la ZMVM. Sin embargo esta funcionalidad no puede ser utilizada por componentes externos al SIG, como son programas de escritorio, programas Web, Bases de Datos, etc. Sólo es funcional para usuarios que tengan instalado el software, además de ser un sistema monousuario que funciona bajo plataformas Windows.

Uno de los objetivos del LTST es el desarrollo de un SIG-TC vía Web, con el fin de ampliar su utilización de tal manera que pueda ser consultado por diferentes tipos de usuarios, gracias a la facilidad que brinda la interfaz Web; además, para aprovechar los avances en telecomunicaciones que permiten relacionar sistemas de información que utilizan Internet, mediante navegadores

Web incluso dispositivos móviles, los cuales hagan uso de la información geográfica almacenada en un solo punto, y de algoritmos para análisis espacial y específicamente para análisis de transporte. A futuro la arquitectura propuesta para los sistemas con acceso mediante el Web es la que se muestra en la figura 4.1



**Figura 4.1** Arquitectura general de sistemas Web aplicados al transporte

Fuente: Laboratorio de Transporte y Sistemas Territoriales, II-UNAM.

Por lo mencionado anteriormente, surge la tarea de implementar un algoritmo para encontrar la ruta mínima (en distancia), lo cual constituiría una de las herramientas del SIG-TC vía Web a desarrollar en el LTST.

## **4.2 Requerimientos para la implementación del algoritmo Dijkstra**

La implementación del algoritmo de Dijkstra sigue una metodología de proceso unificado. A continuación se describen sus requerimientos funcionales y no funcionales:

1. La implementación del algoritmo Dijkstra debe operar en la capa de bases de datos mediante el lenguaje declarativo SQL (Structure Query Language), específicamente el dialecto Transact-SQL de Microsoft SQL-Server, que puede ser aprovechado en cualquier otro gestor de bases de datos, como Postgres, Oracle, MySQL o DB2 por mencionar los más importantes. Con esto se logra evitar la transmisión de gran cantidad de información fuera de la capa de datos, lo que muy probablemente acarrearía tráfico de información por red.
2. La implementación del algoritmo de ruta mínima formará parte de las herramientas del SIG-TC vía WEB y de desarrollos futuros del Laboratorio de Transportes y Sistemas Territoriales (LTST).
3. El algoritmo debe ser eficiente en el procesamiento de los datos, ya que debe estar diseñado para ser utilizado en entornos multiusuarios, razón por la cual también debe contar con seguridad implementada desde la propia Base de Datos.
4. La implementación del algoritmo debe servir para cualquier red vial o carretera.

En la figura 4.2 se muestra el diagrama de casos de uso, con los procedimientos para implementar el algoritmo de Dijkstra.

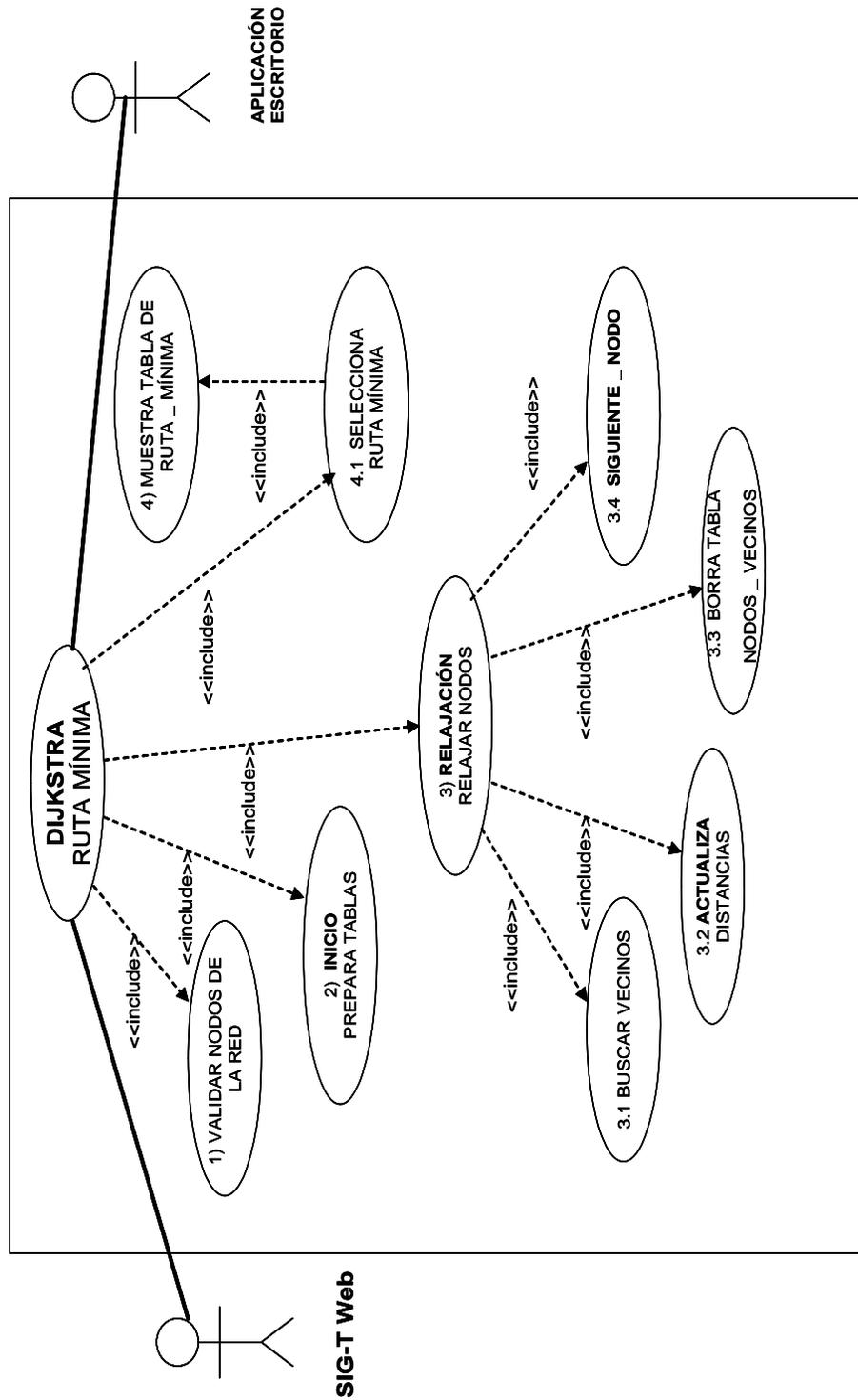


Figura 4.2 Diagrama de casos de uso para la implementación del algoritmo Dijkstra

Para optimizar el código en SQL fueron utilizados procedimientos almacenados, lo cual ofrece una arquitectura modular y asegura que el acceso y la modificación de los datos se hagan de una forma coherente. Además, permite reducir el tráfico de red, pues en lugar de enviar cientos de instrucciones de “Transact-SQL” por la red, sólo se envía una única instrucción que realiza una operación compleja, lo que reduce el número de solicitudes que se envían entre el cliente y el servidor. En la figura 4.3 se muestra el diseño general para implementar el algoritmo de Dijkstra; las tablas sombreadas indican que serán importadas del SIG-TC.

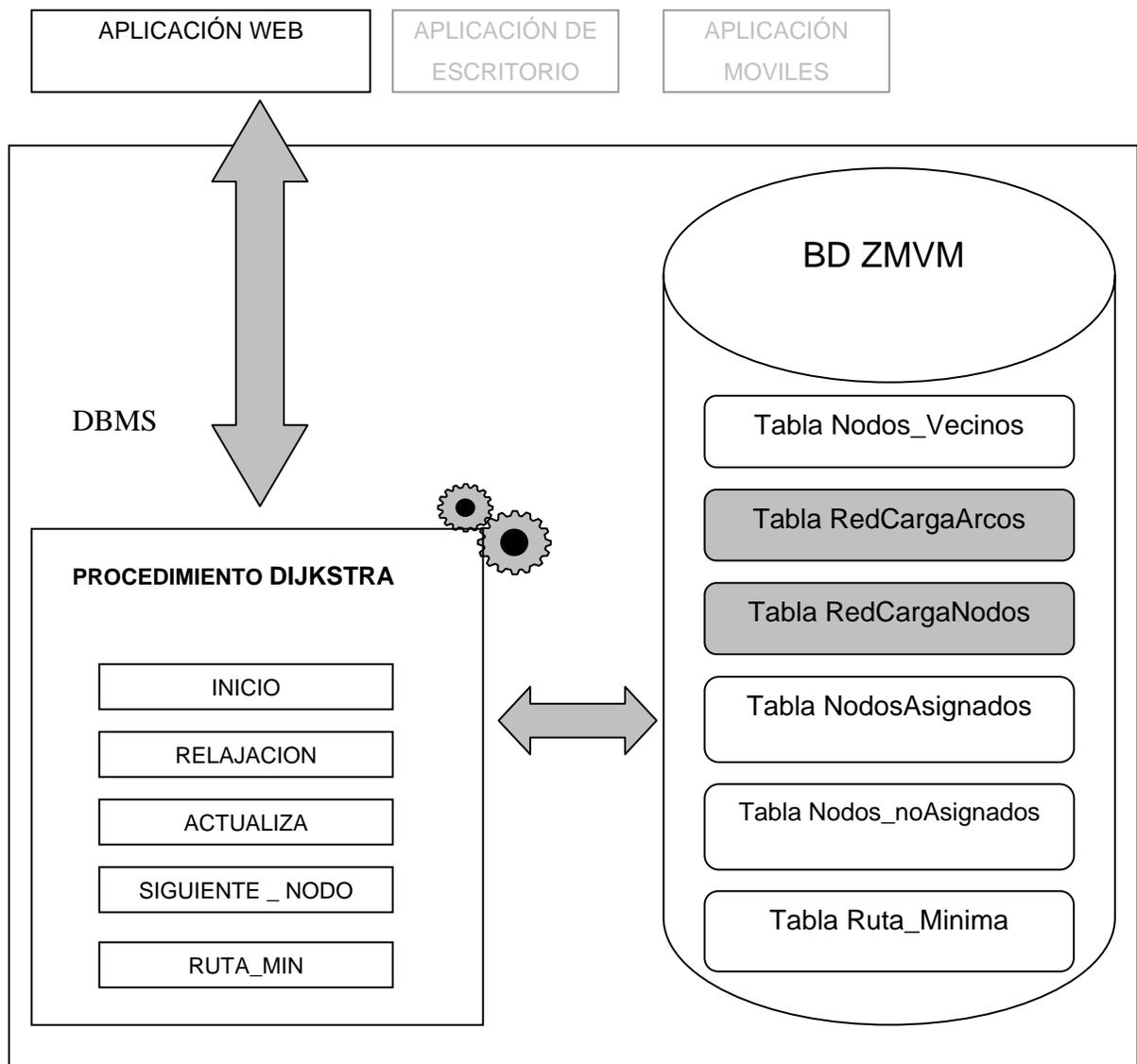


Figura 4.3 Diseño general para la implementación del algoritmo de Dijkstra.

### **4.3 Características del Sistema de Información Geográfica para el Transporte de Carga (SIG-TC)**

La red vial principal de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es representada mediante un grafo, conformado por miles de nodos y arcos. Será utilizada la red vial principal localizada en las delegaciones del DF y 34 municipios metropolitanos del Estado de México. Esta red está incluida en el Sistema de información Geográfica para el Transporte de carga (SIG-TC) del LTST del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

El Sistema de información Geográfica para el Transporte de carga (SIG-TC) integra información fundamental para el soporte a la toma de decisiones, las cuales contribuyan al mejoramiento de transporte de carga en la ZMVM y a la mitigación de sus impactos ambientales, (Lozano *et al.*, 2006). Así que, la red vial que incluye el SIG-TC, es aquella por donde circulan vehículos medianos y pesados de transporte de carga, es decir, camiones de carga de 3.5 toneladas en adelante y tractocamiones articulados y doblemente articulados.

La información de la base de datos geográfica del SIG-TC puede ser desplegada en capas temáticas; el cruce de capas permite realizar diversos análisis espaciales. En la figura 4.4, se muestra un ejemplo de la capa de la red vial del SIG-TC. La estructura de la información se compone de dos tipos distintos de datos; por un lado, los datos espaciales que se refieren a la ubicación geográfica, y por el otro lado, los datos de atributos que describen o caracterizan a los primeros (datos espaciales).

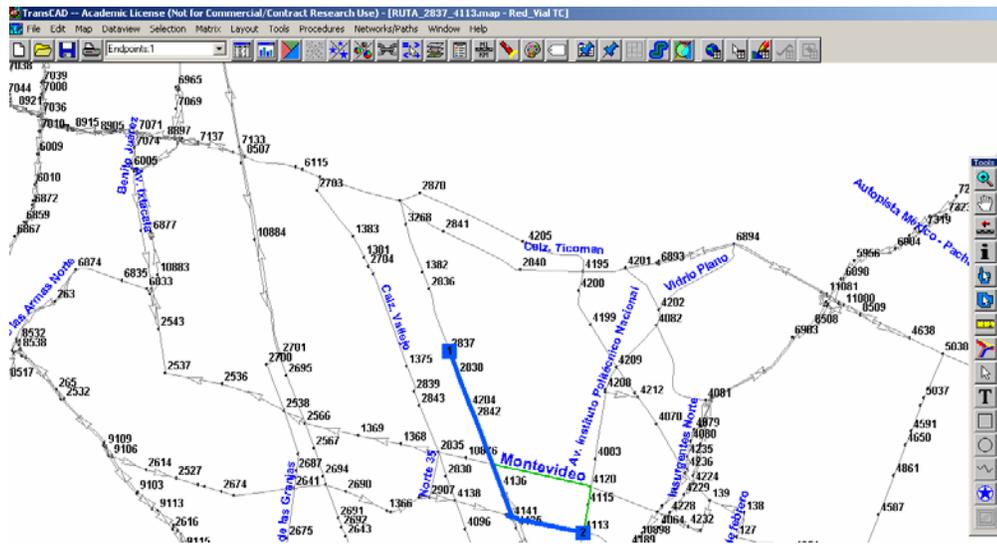


Figura 4.4 Porción de Red Vial del SIG-T en TransCAD, LIST.

La información contenida en el SIG-TC se encuentra clasificada como sigue (Lozano *et al.*, 2006):

- a) Oferta y Demanda del Transporte de Carga. Incluye información sobre padrones vehiculares de los servicios público local, público federal y mercantil privado, niveles socioeconómicos, usos de suelo, polos económicos, unidades de demanda (centros comerciales, supermercados, tianguis, tiendas especializadas, tiendas de barrio), además de parques industriales, estaciones de gas, unidades hospitalarias, escuelas de educación media y superior, así como aforos vehiculares.
- b) Muestra Origen-Destino para el Transporte de Carga. Incluye información de estadísticas del transporte de carga (oficinas, lugares de encierro y operaciones de los distintos tipos de servicio de transporte de carga), líneas de deseo y viajes internos (por tipo de servicio y por tipo de vehículos; y poblacionales por tipo de vehiculo para la hora pico).
- c) Corredores Metropolitanos de Transporte de Carga. Incluye información sobre la red de corredores de transporte de carga, además de corredores por carga de prioridad, flujos

máximos en hora pico de vehículos medianos y pesados en cada arco de la red de corredores.

- d) Áreas de Reserva para uso exclusivo de Actividades Logísticas. Incluye información sobre los polígonos de las áreas aún disponibles con potencial para ser reservadas a uso exclusivo de actividades logísticas.

### 4.3.1 Características de la capa “Red Vial” de Transporte de Carga en el SIG-TC

Este estudio se centra en la capa de la red vial de carga, ya que contiene información correspondiente a las vialidades primarias o principales de la ZMVM. La capa de la red vial contiene los arcos y nodos y la relación entre ellos, lo que conforma dicha red.

Cada vialidad está seccionada por tramos, a los cuales se les denomina arcos. Cada arco de la red contiene un identificador diferente. Este identificador sirve para relacionar los arcos con el resto de la información que se encuentra en la base de datos. Los nodos comprenden el total de intersecciones que fueron necesarias para seccionar la red vial. Cada nodo tiene su correspondiente identificador. En la figura 4.5 se aprecia parte del grafo de la red vial de la ZMVM.

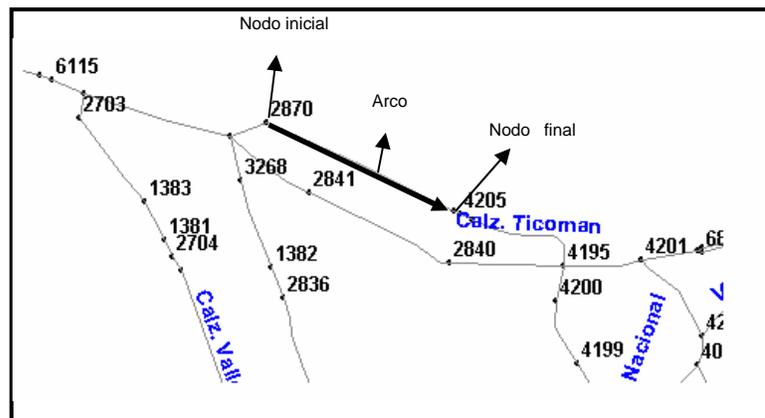


Figura 4.5 Parte de la Red Vial del SIG-T.

Fuente: Laboratorio de Transporte y Sistemas Territoriales, II-UNAM

A continuación se presentan las características de la red vial de carga de la ZMVM, las cuales fueron consideradas para elegir el algoritmo de ruta mínima más adecuado:

- La red dispone de 4492 arcos y 3740 nodos.
- De acuerdo a las características de la red, corresponde a un grafo conexo y dirigido (ya que cada arco está direccionado y contiene distancias positivas).
- El número máximo de arcos incidentes en un nodo es 4.
- Se puede decir que el grafo de la red vial de la ZMVM, es un grafo disperso ya que la relación **arcos/nodos**, es de 1.2, la cual resulta ser más pequeña que  $n^2$ , que es de 1,39,887,600.

En lo sucesivo a la red vial de transporte de carga se le denominará solamente “Red vial de la ZMVM”.

#### ***4.4 Primera etapa de implementación: Construcción de la base de datos relacional para la red vial de la ZMVM***

La primera etapa, consistió en preparar la base de datos relacional con la información geográfica de la red vial de la ZMVM, haciendo uso del gestor de bases de datos SQL-Server 2005. Este gestor tiene la particularidad de manejar la información espacial y no espacial, ya que cuenta con extensiones para el manejo de datos espaciales.

Fueron exportados los archivos del SIG-TC que contienen la información de la capa de la red vial, y posteriormente importados a una base de datos relacional en SQL-Server de nombre “ZMVM”.

En la base de datos “ZMVM” se tienen dos tablas: la tabla que contiene la información de los arcos y otra tabla que contiene información de los nodos de la red vial. Los datos mantienen la misma estructura y el mismo tipo de datos que los archivos geográficos utilizados en el SIG-TC.

De esta manera, se logra obtener una base de datos relacional que permite manipular los datos de ambos elementos (nodos y arcos). En las tablas 4.1 y 4.2, se muestra la descripción de los atributos de los arcos y nodos.

#### 4.4.1 Descripción de los campos de la tabla “RedCargaArcos”

ISITI2N088.ZM....redCargaArcos		Detalles del Ex...ador de objetos	
	Nombre de columna	Tipo de datos	Permitir valores nulos
	oid	int	<input type="checkbox"/>
	geometria	varbinary(MAX)	<input checked="" type="checkbox"/>
	ID	bigint	<input checked="" type="checkbox"/>
	LENGTH	float	<input checked="" type="checkbox"/>
	DIR	smallint	<input checked="" type="checkbox"/>
	NOMBRE	varchar(4000)	<input checked="" type="checkbox"/>
	FROM_ID	bigint	<input checked="" type="checkbox"/>
	TO_ID	bigint	<input checked="" type="checkbox"/>
	geometria_Envelope_MinX	float	<input checked="" type="checkbox"/>
	geometria_Envelope_MinY	float	<input checked="" type="checkbox"/>
	geometria_Envelope_MaxX	float	<input checked="" type="checkbox"/>
	geometria_Envelope_MaxY	float	<input checked="" type="checkbox"/>

**Tabla 4.1** Tabla “RedCargaArcos” (importada del SIG-TC) en SQL-Server 2005.

A continuación se describen las características de cada uno de los campos (atributos) de la tabla “RedCargaArcos”:

- **Atributo “Oid”.** Es el identificador o llave primaria, de cada arco de la tabla “RedCargaArcos”, que SQL-Server le asignó cuando se importaron los datos.
- **Atributo “ID”.** Es el identificador o llave primaria de cada arco de la tabla “RedCargaArcos” que viene desde el SIG-TC.

- **Atributo “LENGHT”**. Es la longitud en metros de cada uno de los arcos de la red.
- **Atributo “DIR”**. Es el sentido de las vialidades, teniendo:
  - 0 cuando la vialidad está en doble sentido.
  - 1 cuando el sentido de la dirección real coincide con el sentido de la dirección topológica de la red original en el SIG-TC, y -1 cuando el sentido de la dirección real es inverso al sentido de la dirección topológica de la red original en el SIG-TC.
- **Atributo “To\_ID”**. Nodo origen del arco.
- **Atributo “From\_ID”**. Nodo destino del arco.
- **Atributo “Nombre”**. Etiqueta o nombre del arco, el cual contiene el nombre de la vialidad que representa.
- **Atributo “Geometría”**. El tipo de dato geométrico que tiene la red vial. En este caso, los arcos que representan las vialidades son del tipo lineal.
- **Atributo “Geometría\_Envelope”**. Tiene que ver con atributos de tipo espacial, que se refieren a las coordenadas que definen el rectángulo más pequeño que puede contener al objeto definido, en el campo geometría.

Para la implementación del algoritmo, no es necesario utilizar los dos últimos atributos mencionados, que son atributos de tipo espacial, pero éstos son indispensables para posteriores consultas de tipo espacial a la Base de Datos.

#### 4.4.2 Descripción de los campos de la tabla “RedCargaNodos”

ISITI2N088.ZM....redCargaNodos		Detalles del Ex...ador de obj	
	Nombre de columna	Tipo de datos	Permitir v...
	oid	int	<input type="checkbox"/>
	geometria	varbinary(MAX)	<input checked="" type="checkbox"/>
	 ID	bigint	<input type="checkbox"/>
	LONGITUDE	bigint	<input checked="" type="checkbox"/>
	LATITUDE	bigint	<input checked="" type="checkbox"/>
	geometria_Envelope_MinX	float	<input checked="" type="checkbox"/>
	geometria_Envelope_MinY	float	<input checked="" type="checkbox"/>
	geometria_Envelope_MaxX	float	<input checked="" type="checkbox"/>
	geometria_Envelope_MaxY	float	<input checked="" type="checkbox"/>

**Tabla 4.2** Tabla de “RedCargaNodos”, SQL-Server.

A continuación se describen las características de cada uno de los campos (atributos) de la tabla “RedCargaNodos”:

- **Atributo “Oid”:** Es el identificador o llave primaria de cada nodo de la tabla “RedCargaNodos” que SQL-Server le asignó cuando se importaron los datos.
- **Atributo “ID”:** Es el identificador o llave primaria de cada nodo de la tabla “RedCargaNodos” que viene desde el SIG-TC.
- **Atributo “Geometría”:** Es el tipo de dato geométrico, en este caso corresponden a posiciones puntuales.
- **Atributo “Longitude”, “latitude”:** Corresponden a las coordenadas del lugar donde está ubicado el nodo.
- **Atributo “Geometría\_Envelope”.** Tiene que ver con atributos de tipo espacial que se refieren a las coordenadas que definen el rectángulo más pequeño que puede contener al

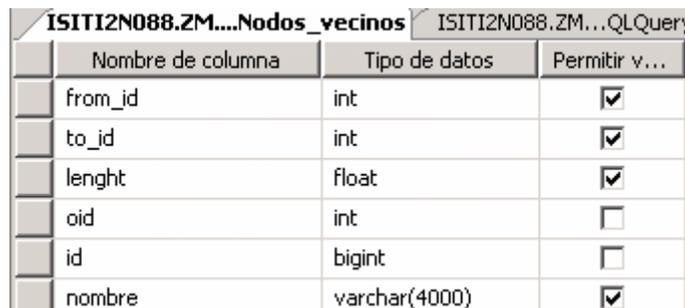
objeto definido en el campo geometría. De igual manera, los campos o atributos del tipo espacial no son utilizados.

En resumen, en esta etapa fue preparada la base de datos “ZMVM”, que consistió en la importación de los archivos que contienen la información de los arcos y los nodos de la red vial. De manera que la base de datos “ZMVM” sólo cuenta hasta el momento con dos tablas, una correspondiente a la información de los nodos y la otra a la de los arcos.

La segunda etapa consiste en la utilización de procedimientos almacenados para dividir las tareas del algoritmo. Para ello se construyen las tablas que se describen a continuación:

#### 4.4.3 Descripción de la Tabla “Nodos\_Vecinos”

En esta tabla se almacenan los nodos adyacentes o vecinos al nodo origen de cada iteración, para ir construyendo el camino más corto. Las columnas de las cuales está formada la tabla “Nodos\_Vecinos” fueron tomadas de la tabla “RedCargaArcos”, tabla 4.3.



Nombre de columna	Tipo de datos	Permitir v...
from_id	int	<input checked="" type="checkbox"/>
to_id	int	<input checked="" type="checkbox"/>
lenght	float	<input checked="" type="checkbox"/>
oid	int	<input type="checkbox"/>
id	bigint	<input type="checkbox"/>
nombre	varchar(4000)	<input checked="" type="checkbox"/>

**Tabla 4.3** Tabla “Nodos\_Vecinos”, en SQL-Server 2005

#### 4.4.4 Descripción Tabla “Nodos\_noAsignados”

La tabla “Nodos\_NoAsignados” contiene distancias intermedias; la mejor distancia es seleccionada en cada iteración. El campo nodo se llena con base en la tabla RedCargaNodos, tabla 4.4.

- En el campo “d” se hacen los cálculos para obtener la distancia mínima.
- El campo “predecesor” contiene el nodo que le antecede, útil para ir formando la ruta.
- Los campos “oid, id y nombre” contienen información necesaria de los arcos que van formando la ruta y que están ligados al campo predecesor.

ISITI2N088.Z...s_noAsignados			
	Nombre de columna	Tipo de datos	Permitir valores nulos
	nodo	bigint	<input type="checkbox"/>
	d	float	<input checked="" type="checkbox"/>
	predecesor	bigint	<input checked="" type="checkbox"/>
	oid	int	<input checked="" type="checkbox"/>
	id	bigint	<input checked="" type="checkbox"/>
	nombre	varchar(400)	<input checked="" type="checkbox"/>

**Tabla 4.4** Tabla “Nodos\_NoAsignados” , en SQL-Server 2005.

#### 4.4.5 Descripción Tabla “NodosAsignados”

En la tabla “NodosAsignados” se muestran los resultados finales, es decir la distancia mínima en metros y las rutas mínimas a cada nodo intermedio que va siendo seleccionando desde el nodo origen hasta el nodo destino, tabla 4.5.

ISITI2N088.ZM...odosAsignados			
	Nombre de columna	Tipo de datos	Permitir valores nulos
	nodo	bigint	<input type="checkbox"/>
	min_distancia	float	<input checked="" type="checkbox"/>
	predecesor	bigint	<input checked="" type="checkbox"/>
	oid	int	<input checked="" type="checkbox"/>
	id	bigint	<input checked="" type="checkbox"/>
	nombre	varchar(4000)	<input checked="" type="checkbox"/>

**Tabla 4.5** Tabla “NodosAsignados”, en SQL-Server 2005.

#### 4.4.6 Descripción Tabla “RUTA\_MINIMA”

La tabla “RUTA\_MINIMA” solamente es una tabla auxiliar que contiene sólo la ruta mínima desde el nodo origen hasta el nodo destino y que no necesita de llave primaria, ya que la extracción de su información es exclusivamente en el orden natural en que fueron ingresados sus registros, sin requerir de búsquedas exhaustivas o complejas, figura 4.6.

ISITI2N088.Z...o.RUTA_MINIMA			
Detalles del Ex...ador de objetos			
	Nombre de columna	Tipo de datos	Permitir valores nulos
	nodo	bigint	<input type="checkbox"/>
	min_distancia	float	<input checked="" type="checkbox"/>
	predecesor	bigint	<input checked="" type="checkbox"/>
	oid	int	<input checked="" type="checkbox"/>
	id	bigint	<input type="checkbox"/>
	nombre	varchar(4000)	<input type="checkbox"/>

**Tabla 4.6** La tabla “RUTA\_MINIMA”, en SQL-Server 2005.

El diseño completo de la base de datos ZMVM, se construye de las tablas base “RedCargaArco” y “RedCargaNodo”, importadas del SIG-TC, y de las tablas “Nodos\_Vecinos”, “Nodos\_noAsignados”, “NodosAsignados” y “RUTA\_MINIMA”, como se muestra en el diagrama Entidad-Relación, figura 4.6.

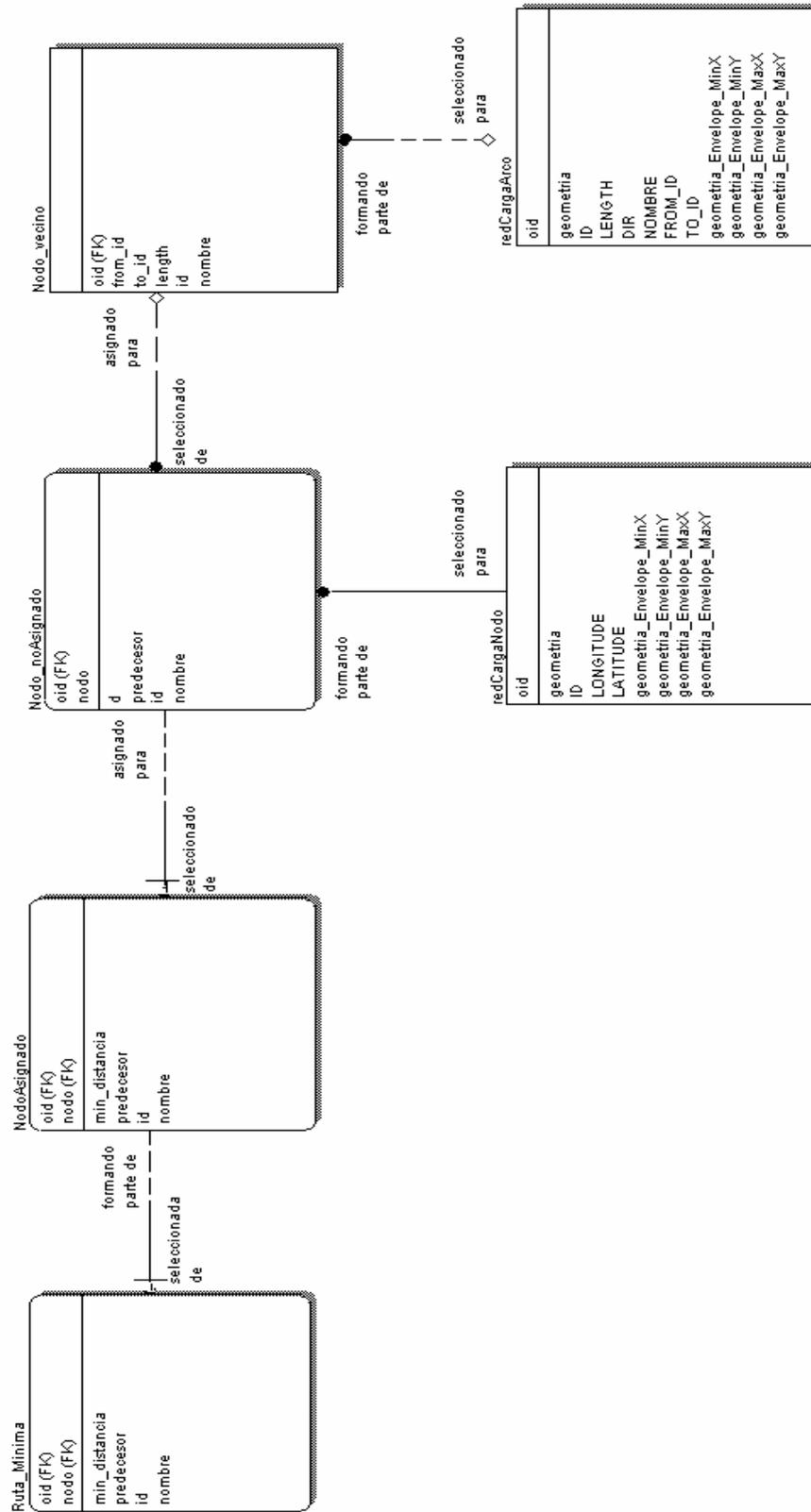


Figura 4.6 Diagrama Entidad –Relación, elaborado con la herramienta Erwin

#### **4.5 Segunda etapa de implementación: Procedimientos almacenados para la implementación del algoritmo de Dijkstra**

Para implementar el algoritmo, fueron tomadas en cuenta las siguientes consideraciones:

- Todos los nodos en la red están conectados, por lo tanto siempre hay algún camino asegurado.
- Se utiliza la técnica de relajación, que es un método para hacer más entendibles los algoritmos de ruta mínima.
- Se validan los nodos contenidos en la red cuando se ejecuta el procedimiento principal, de tal manera que si un nodo no existe en la red, se envía un mensaje de error.
- El gestor de bases de datos con el que se cuenta para implementar el algoritmo es SQL-Server 2005.

La *Relajación* es el método mediante el cual se hace decrecer la cota superior en el “peso” actual de la ruta más corta hasta que iguale a la cota de la ruta más corta. En otras palabras, *Relajar* es mejorar la distancia de un nodo a otro conforme se va construyendo la ruta más corta (Cormen, *et al.*, 2003).

La relajación inicia estableciendo la distancia entre el origen y el destino, como un valor infinito. Para programar esto, se sustituye el valor infinito por un valor superior a la suma de las longitudes de todos los arcos de la red vial de la ZMVM, lo cual dio un valor de 1,221,000 m.

De acuerdo al diseño, la programación del algoritmo se hizo en SQL con Transact SQL, ya que permite extender el SQL estándar con otro tipo de instrucciones que son característicos de los lenguajes de programación: variables, sentencias de control de flujo, bucles, etc. Otro aspecto

importante en la programación del algoritmo fue el uso de procedimientos almacenados, los cuales se describen más adelante. A continuación se presenta el diagrama de flujo de la programación del algoritmo de Dijkstra. Ver figura 4.7

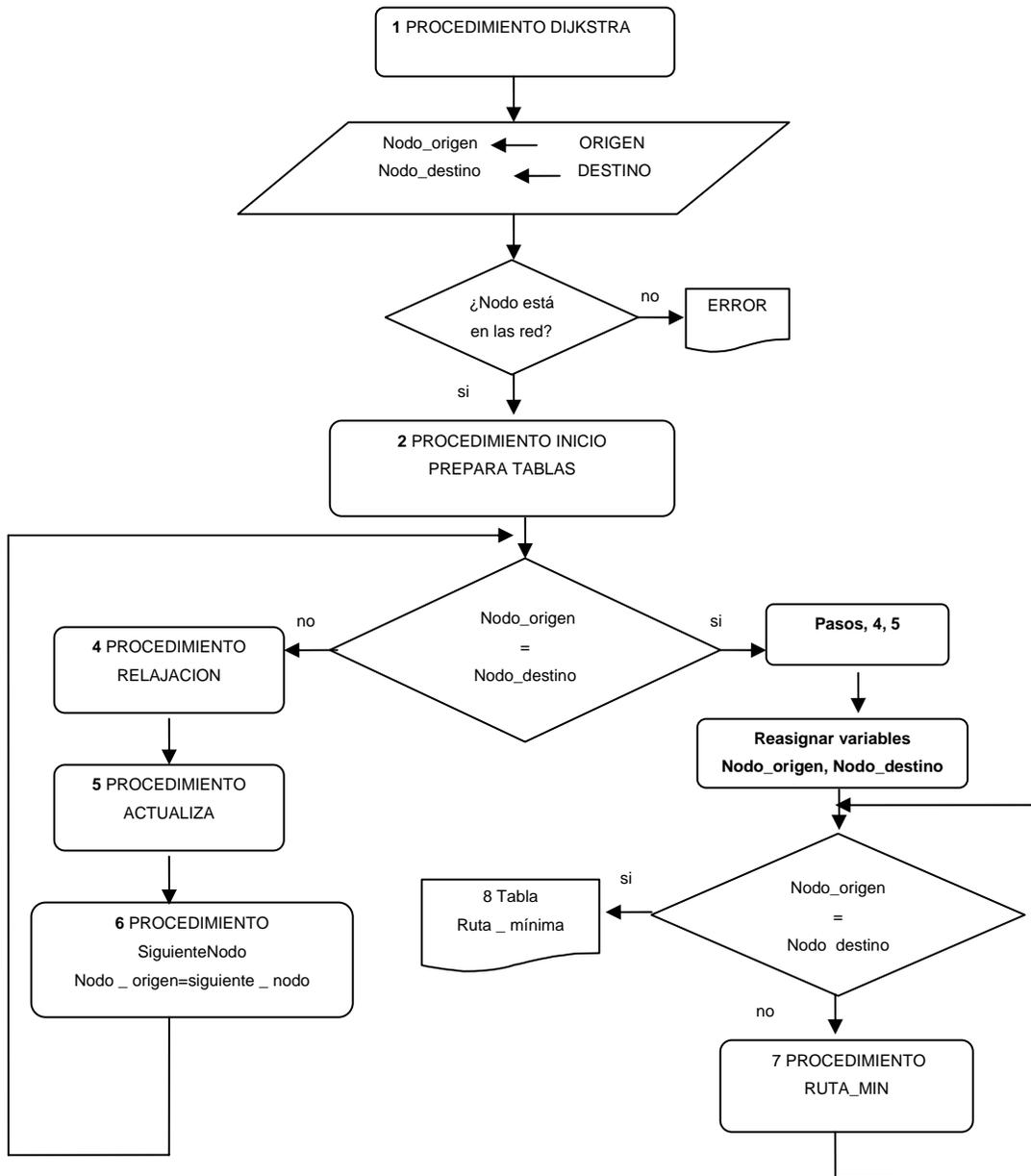


Figura 4.7 Diagrama de flujo de la implementación Dijkstra

### 4.5.1 Procedimiento almacenado “DIJKSTRA”

El procedimiento DIJKSTRA es el procedimiento más externo o principal que llama a los procedimientos INICIO, RELAJACION, RUTA\_MIN, ACTUALIZA y SiguienteNodo. A continuación se describen cada uno de los procedimientos:

1. Para llamar al procedimiento DIJKSTRA es necesario darle como parámetros de entrada, el nodo origen y el nodo destino.

DIJKSTRA @nodo\_origen, @nodo\_destino

2. Verifica que los parámetros de entrada (nodo\_origen, nodo\_destino) existan en la red, de lo contrario muestra un mensaje de error.
3. A partir de aquí, el procedimiento “DIJKSTRA” llama al procedimiento “INICIO” para limpiar y preparar las tablas: “NodosAsignados”, “Nodos\_Vecinos”, “Nodos\_NoAsignados” y “Ruta \_ minima”. La tabla Nodos\_Vecinos se limpia en cada iteración por el procedimiento ”DIJKSTRA” para elegir los siguientes nodos adyacentes.
4. Llama al procedimiento “RELAJACION”, el cual busca los nodos adyacentes o vecinos y aplica la técnica de relajación. El procedimiento se ejecutará tantas veces sea necesario hasta llegar al nodo\_destino, al igual que el procedimiento “ACTUALIZA”.
5. El procedimiento “ACTUALIZA” actualiza la tabla “NodosAsignados” en la cual va almacenando el camino que contiene la mínima distancia.
6. Se ejecuta el procedimiento “SiguienteNodo”, que elige la mínima distancia y el siguiente nodo a evaluar.

7. El algoritmo se detiene cuando encuentra el nodo destino, evitando encontrar todas las rutas mínimas a todos los nodos restantes de la red.
8. Por último, cuando se llega al nodo destino, se llama al procedimiento “RUTA\_MIN”, para elegir sólo la ruta que marca los parámetros que guardan los valores de los nodos origen y destino, la cual es almacenada en la tabla “RUTA\_MINIMA”.

A continuación se describen a detalles cada uno de los procedimientos:

#### **4.5.2 Procedimiento almacenado “INICIO”**

Se ejecuta una sola vez y se encarga de la preparación de las tablas auxiliares.

1. Elimina los registros de las tablas “NodosAsignados”, “Nodos\_Vecinos”, “Nodos\_NoAsignados” y “Ruta \_ minima”.
2. Llena la tabla “Nodos\_NoAsignados” con todos los nodos de la red, cuya distancia inicialmente tendrá un valor de 1,221,000 m, a excepción del nodo origen que debe tener una distancia igual a cero.
3. Llena los campos predecesor, oid, id, nombre de la tabla “Nodos\_NoAsignados” con un valor “null”.

La tabla “Nodos\_NoAsignados” debe quedar como se muestra en la tabla 4.7. Para este ejemplo el campo d (distancia) tiene un valor “0” porque el nodo origen es el 8038.

	nodo	d	predecesor	oid	id	nombre
3...	7980	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8008	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8021	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8027	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8028	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8029	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8032	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8033	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8034	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8037	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8038	0	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8039	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8040	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8044	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8074	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8075	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8080	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8081	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8101	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL
3...	8102	1221000	NULL	NULL	NULL	NULL

Tabla 4.7 Tabla “Nodos\_noAsignados” en SQL-Server 2005.

### 4.5.3 Procedimiento almacenado “RELAJACION”

Este procedimiento aplica la técnica de relajación, descrita anteriormente. Los pasos son los siguientes:

1. Elige todos los nodos que sean adyacentes (vecinos) al nodo origen, es decir el conjunto de candidatos que van a formar la ruta mínima y los almacena en la tabla “Nodos\_Vecinos”.

De acuerdo a las características de la red, los arcos pueden tener una dirección de flujo 0, 1 o -1, que se refieren a dirección de flujo en ambos sentidos, dirección de flujo que coincide con el sentido topológico y la dirección de flujo en sentido inverso a la dirección topológica, respectivamente.

Se obtienen los nodos adyacentes considerando la dirección de los arcos adyacentes a evaluar. Si la dirección del arco tiene un valor de 0 o 1 (1 porque la dirección topológica coincide con la dirección real de la vialidad, que es identificada por el arco a evaluar), se insertan los nodos (cola y cabeza del arco)<sup>1</sup> en las columnas “from\_id” y “to\_id” de la tabla nodos vecinos, respectivamente. Si la dirección del arco tiene un valor de 0 o -1 (-1 porque la dirección topológica es inversa a la dirección real de la vialidad que es identificada por el arco a evaluar), se inserta el nodo cabeza en la columna “from\_id” y el nodo cola en la columna “to\_id” de la tabla nodos vecinos. Se anexa el código parcial que busca los nodos adyacentes o vecinos, en la figura 4.8.

```
1 INSERT INTO nodos_vecinos
2     SELECT      from_id, to_id, length ,oid, id, nombre
3     FROM        RedCargaArcos
4     WHERE       (from_id = @origen) and (DIR=1 or dir=0)

5 INSERT INTO nodos_vecinos
6     SELECT      to_id, from_id, length,oid, id, nombre
7     FROM        RedCargaArcos
8     WHERE       ((to_id=@origen) and (DIR=0 or DIR=-1))
```

**Figura 4.8** Código parcial, en SQL-Server 2005, que busca nodos adyacentes

---

<sup>1</sup> Cabeza y cola de un arco dirigido. Ambas son nodos extremos del arco; la cabeza del arco es representada por una flecha y la cola del arco es el inicio de la flecha.

- Después, a todos los nodos adyacentes se les suma la distancia que tenga el nodo\_origen en turno. Éste es el punto en el que se hace decrecer la cota superior (1,221,000) en el peso actual de la ruta más corta, hasta que iguale a la cota de la ruta más corta. Se anexa el código parcial que realiza el procedimiento de relajación, en la figura 4.9.

```
1 UPDATE nodos_vecinos
2     SET lenght = lenght +
3         (SELECT      d
4         FROM Nodos_noAsignados
5         WHERE      (nodo = @origen))

1 UPDATE      Nodos_noAsignados
2     SET      d = nodos_vecinos_1.lenght ,
3     predecesor = nodos_vecinos_1.from_id ,
4     Nodos_noAsignados.oid=nodos_vecinos_1.oid,
5     Nodos_noAsignados.id=nodos_vecinos_1.id,
6     Nodos_noAsignados.nombre=nodos_vecinos_1.nombre
7     FROM      nodos_vecinos
8     AS      nodos_vecinos_1
9     INNER JOIN Nodos_noAsignados
10    ON      nodos_vecinos_1.to_id= Nodos_noAsignados.nodo
11    AND      nodos_vecinos_1.lenght< Nodos_noAsignados.d
```

**Figura 4.9** Código parcial, en SQL-Server 2005, que utiliza el procedimiento de relajación

La tabla “Nodos\_noAsignados” se actualiza cada vez que encuentra una distancia menor de los nodos adyacentes al nodo\_origen, que va comparando con las distancias de los nodos de la tabla “Nodos\_Vecinos”.

#### 4.5.4 Procedimiento almacenado “SiguienteNodo”

Elige el nodo de la tabla “Nodos\_noAsignados” cuya distancia sea la menor, y selecciona el siguiente nodo, que se toma como origen en la siguiente iteración (siguiente nodo candidato).

En caso de haber dos nodos que contienen la mínima distancia, elige el primer nodo que aparece en la tabla “Nodos\_noAsignados”.

El fragmento de código donde se elige el nodo con la mínima distancia, se muestra en la figura 4.9.

```
1 SET @nod =
2     (SELECT top 1 nodo
3     FROM     Nodos_noAsignados
4     WHERE    (d =
5                (SELECT     MIN(d) AS min
6                FROM Nodos_noAsignados )))
```

**Figura 4.9** Código parcial, en SQL-Server 2005, para elegir el siguiente nodo candidato

#### 4.5.5 Procedimiento almacenado “ACTUALIZA”

Este procedimiento es similar el anterior, a excepción de que selecciona el nodo destino del arco, que contiene la mínima distancia y del nodo predecesor (nodo origen) para pasarlos a la tabla “NodosAsignados”.

El resultado final es como se muestra en la tabla 4.6. Para este ejemplo se llama al procedimiento “DIJKSTRA” con los parámetros de entrada 8038 (nodo\_origen), que corresponde a un nodo de la autopista Mexico-Cuernavaca, y 8191 (nodo\_destino), que corresponde a un nodo de la

Av.Tláhuac, lo cual arroja como resultado una distancia mínima de 10,989 m. En la tabla 4.6 se muestra la ruta mínima, en un orden que va desde el destino hasta el origen de la ruta, el “id” del arco, y el nombre o etiqueta del “id”.

	nodo	min_distancia	predecesor	oid	id	nombre
1	8191	10989.626956	4338	1161	12681	Av. Tláhuac
2	4338	10612.399051	4302	1861	7114	Av. Tláhuac
3	4302	10285.022006	4312	1862	7118	Canal de Garay
4	4312	9289.815951	4319	1901	7113	Adolfo Ruíz Cortinez
5	4319	8818.309237	4318	1903	7059	Adolfo Ruíz Cortinez
6	4318	8401.444857	4327	1907	7077	Adolfo Ruíz Cortinez
7	4327	8155.664675	54	1908	7070	Adolfo Ruíz Cortinez
8	54	7425.135988	8888	1915	13701	Adolfo Ruíz Cortinez
9	8888	7026.928163	53	1917	31	Adolfo Ruíz Cortinez
10	53	6641.921205	8885	1922	13697	Adolfo Ruíz Cortinez
11	8885	6261.90732	1209	1927	1606	Adolfo Ruíz Cortinez
12	1209	5950.022554	8882	1938	13692	Adolfo Ruíz Cortinez
13	8882	5888.528333	1151	1937	1550	Adolfo Ruíz Cortinez
14	1151	5838.203012	1150	1944	1456	Adolfo Ruíz Cortinez
15	1150	5371.163736	1190	1951	1631	Adolfo Ruíz Cortinez
16	1190	5323.80858	1178	1952	1525	Adolfo Ruíz Cortinez
17	1178	5151.769655	1177	1955	1506	Adolfo Ruíz Cortinez
18	1177	4441.173769	1181	1957	1508	Adolfo Ruíz Cortinez
19	1181	4282.134539	1221	3880	1624	Adolfo Ruíz Cortinez
20	1221	3953.772967	1222	3883	1636	Adolfo Ruíz Cortinez
21	1222	3402.456317	1153	3884	1625	Adolfo Ruíz Cortinez
22	1153	3095.378955	1145	3886	1466	Adolfo Ruíz Cortinez
23	1145	2720.972491	1144	3890	1451	Anillo Periférico
24	1144	2458.842486	1012	3894	1458	Viaducto Tlalpan
25	1012	2234.059252	963	3898	1245	Viaducto Tlalpan
26	963	1967.207934	670	3899	1186	Viaducto Tlalpan
27	670	1947.859107	9049	3904	13937	Viaducto Tlalpan
28	9049	1596.383033	669	3909	692	Viaducto Tlalpan
29	669	1167.713111	866	3914	920	Viaducto Tlalpan
30	866	975.226707	9056	3918	13944	Viaducto Tlalpan
31	9056	791.036171	9055	3919	13945	Viaducto Tlalpan
32	9055	702.990921	873	3921	931	Viaducto Tlalpan
33	873	573.62738	862	3935	928	Autopista - Viaduct...
34	862	343.172363	865	3941	930	Insurgentes Sur
35	865	65.126953	8038	3946	1084	Autopista México -...

Figura 4.6 “RUTA \_ MINIMA”, en SQL-Server 2005

#### ***4.6 Tercera etapa de implementación: Uso de transacciones en el algoritmo Dijkstra***

La última etapa consistió en la implementación de transacciones, ya que uno de los objetivos especifica que el algoritmo implementado debe ser utilizado por sistemas multiusuarios, es decir, la Base de Datos debe admitir múltiples conexiones para hacer uso del algoritmo.

Para que más de un usuario pueda hacer uso del algoritmo, es necesario que cada transacción realizada cumpla con las cuatro propiedades fundamentales, comúnmente conocidas como ACID (atomicidad, coherencia, aislamiento y durabilidad) de forma que los datos se confirmen correctamente en la Base de Datos. Estas propiedades hacen que un conjunto de operaciones sean tratadas como una unidad, para de esta manera evitar que un usuario altere los resultados de otro usuario.

Se utilizaron transacciones explícitas, con la instrucción `BEGIN TRANSACTION` y con las instrucciones `COMMIT` o `ROLLBACK`, dentro del procedimiento almacenado más externo (procedimiento `DIJSKTRA`). De esta manera, cada vez que un usuario llame al procedimiento, éste debe esperar, si es que está siendo utilizado por otro usuario, para así asegurar que cada instrucción contenida en el procedimiento almacenado se ejecute de manera correcta hasta llegar a su fin.

## ***CAPÍTULO 5***

### ***PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DIJKSTRA***

En este capítulo se presenta la simulación de diferentes escenarios para detectar los posibles errores y los límites de rendimiento con los que puede trabajar la implementación del algoritmo Dijkstra en la base de datos. También se presenta la evaluación de los resultados obtenidos, para definir el umbral de operación e identificar los cambios posibles que mejoren el desempeño de la implementación en versiones posteriores.

No se pretende analizar los problemas de estrés, causados de lado del cliente que hagan uso del algoritmo o por las limitaciones del ancho de banda, sino que el objetivo principal se centra fundamentalmente en la carga, que puede soportar la base de datos en el servidor.

## **1.1 Objetivo de las pruebas**

Para la caracterización de la funcionalidad y desempeño de la implementación del algoritmo Dijkstra se definieron los siguientes objetivos: la realización de las pruebas de funcionalidad y la realización de las pruebas de estrés.

Las pruebas de funcionalidad consisten en la verificación exhaustiva y en diversos escenarios, de las funcionalidades originalmente definidas para el sistema en cuestión; este caso requirió la validación de resultados de forma manual y la comparación con software de referencia. Las pruebas de estrés consisten en la simulación de grandes cargas de trabajo con el propósito de observar de qué forma se comporta la aplicación ante situaciones de uso intenso.

A continuación se describen las tareas de los objetivos citados

### **a) Realización de pruebas de funcionalidad.**

- Comparar los resultados obtenidos (ruta mínima y tiempo de respuesta) del algoritmo Dijkstra implementado contra el utilizado en el software comercial TransCAD.

### **b) Realización de pruebas de estrés.**

- Calcular con precisión la experiencia individual del usuario a medida que aumenta la carga total de usuarios en el sistema.
- Establecer la capacidad mínima del hardware que utiliza la implementación, con el fin de determinar la necesidad de una actualización del hardware.

## 5.2 Pruebas de funcionalidad en el algoritmo Dijkstra implementado

Para comparar los resultados que se obtienen al encontrar la ruta mínima en el algoritmo implementado con SQL contra los resultados que obtiene el algoritmo utilizado por TransCAD, se simuló la entrada de:

- Diferentes nodos orígenes hacia diferentes nodos destino
- Un solo nodo origen hacia diferentes nodos destino, incrementando gradualmente la distancia entre ambos

La tabla 5.1 muestra las distancias mínimas obtenidas de ambos algoritmos y el tiempo que se obtiene al ejecutar la implementación del algoritmo Dijkstra desde SQL Server Management Studio 2005.

RUTA	Nodo Origen	Nodo Destino	Dijkstra en SQL Server 2005 [km]	Transcad [km]	Tiempo Ejecución [s]	Diferencia [km]
FERROCARRIL HIDAGO - 5 DE FEBRERO	14	138	3.394	3.394	2	0.000
CARRETERA TEOLOYUCAN - AV. EJIDAL	5596	8081	19.041	79.705	27	60.664
INSURGENTES NORTE - CALZ. VALLEJO	4149	4131	1.448	1.448	0	0.000
INSURGENTES NORTE - CUAUHTEMOC	4081	2772	12.855	12.855	22	0.000
VIA JOSE LOPEZ PORTILLO - INSURGENTES NORTE	6908	4299	20.778	48.015	30	27.237
CALZ. TLALPAN - CARRETERA FEDERAL CUERNAVACA	3146	841	11.088	11.088	14	0.000
AUTOPISTA MEXICO-CUERNAVACA - AV. TLAHUAC	8038	8191	10.990	15.990	4	5.000
CIRCUITO EXTERIOR MEXIQUENSE - VIA MORELOS	11151	7371	4.904	21.904	4	17.000
LIBRAMIENTO-LA QUEBRADA - TALISMAN	6147	31	24.940	41.940	27	17.000

**Tabla 5.1** Resultado de las pruebas de funcionalidad.

RUTA	Nodo Origen	Nodo Destino	Dijkstra en SQL Server 2005 [km]	Transcad [km]	Tiempo Ejecución [s]	Diferencia [km]
CARRETERA TLANEPANTLA-CUAITUTLAN - AV. MEXICO COYOACAN	5536	1256	23.123	35.851	49	12.729
MEXICO-PACHUCA - CARRETERA MEXICO CUERNAVACA	11082	8032	30.194	53.747	54	23.553
CARRETERA TEXCOCO- BLVR. AVILA CAMACHO	5824	8956	20.407	43.424	43	23.017
BUCARELI-GERRERO - AV. CANAL DE MIRAMONTES	3332	635	14.022	14.022	28	0.000
AUTOPISTA PEÑON-TEXCOCO - AV. REVOLUCION	7258	2030	21.227	36.492	49	15.264
CALZ. TLALPAN - AV. CHAPULTEPEC	3026	2166	14.301	14.301	15	0.000
VIA GUSTAVO BAZ PRADA - VIA MORELOS	7125	7379	12.795	35.683	12	22.889
LAZARO CARDENAS - LATERAL INSURGENTES	2837	4144	6.110	6.110	3	0.000
LAZARO CARDENAS - AV. CUAUHTEMOC	2837	8303	22.280	45.055	47	22.774
LAZARO CARDENAS - ERMITA AUTOPISTA	2837	5312	19.983	29.742	42	9.758
LAZARO CARDENAS - RIO CONSULADO	2837	9020	11.903	13.394	15	1.491
LAZARO CARDENAS - EJE 1 NORTE	2837	108	9.967	11.458	9	1.491
LAZARO CARDENAS - TALISMAN	2837	4854	6.127	7.618	3	1.491
LAZARO CARDENAS - AV. INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL	2837	4113	2.795	3.736	0	0.941

**Tabla 5.1** Resultado de las pruebas de funcionalidad (continuación).

### **5.3 Resultados obtenidos de las pruebas de funcionalidad**

Al comparar los resultados, se observa que en general la distancia mínima obtenida por el algoritmo de Dijkstra implementado en SQL es mejor que la distancia mínima obtenida por el algoritmo utilizado por TransCAD, logrando una diferencia que va desde metros hasta kilómetros. Esto es debido a que TransCAD utiliza otro tipo de algoritmo aproximado de ruta mínima, el cual no es especificado por la compañía.

Sin embargo, el tiempo de ejecución máximo para obtener algunas de las rutas más largas en la red, es de aproximadamente 1 [min] con el algoritmo de Dijkstra implementado en SQL, lo cual es un tiempo considerablemente largo para consultarse a través de clientes Web, ya que faltaría aún contemplar el tiempo total.

## **5.4 Pruebas de estrés a la base de datos**

En esta etapa se realizó una configuración piloto del sistema en un entorno controlado, para observar cómo es afectada dicha configuración al aumentar la carga de usuarios, y con el fin de determinar cuál es el máximo número de usuarios que puede soportar la base de datos. La configuración se hizo de acuerdo a los recursos disponibles (procesador, memoria, etc.).

### **5.4.1 Configuración del escenario para las pruebas de carga**

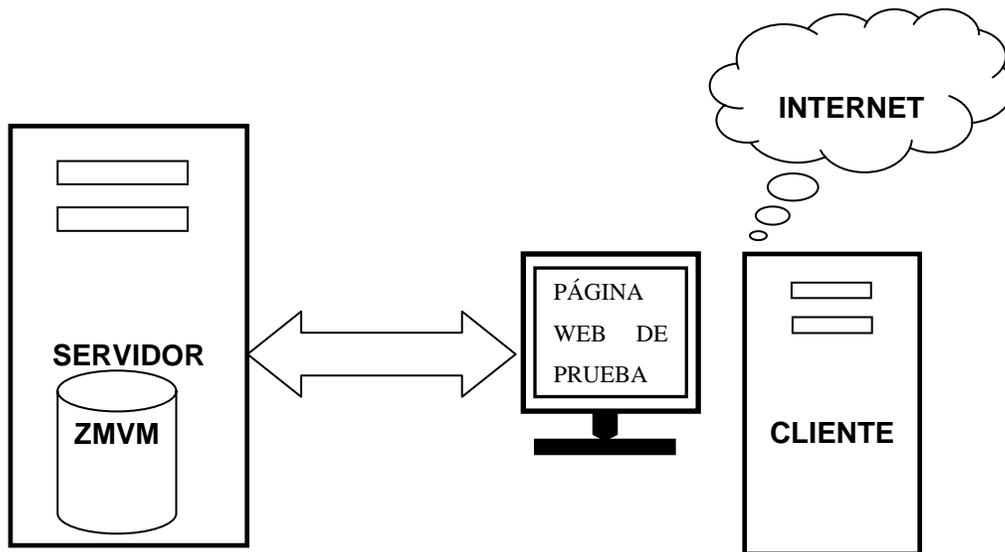
La base de datos se colocó en una máquina que funcionó como servidor y la aplicación de una página Web de prueba<sup>1</sup>, en otra máquina que sirvió como cliente.

La base de datos “ZMVM” fue trasladada a una máquina servidor con 2 procesadores Intel Xeon con 2.33 [Ghz] de velocidad, 8 [Gb] de Ram y S.O. Windows 2003 Server. El objetivo fue aislar la base de datos en el servidor y mantener al cliente (aplicación Web) en otra máquina, para evitar que la carga en el servicio Web afectara al rendimiento del manejador de base de datos.

Las características de la máquina cliente donde se colocó la aplicación son las siguientes: Pentium 4 a 3.2 [Ghz] de velocidad, con 1.5 [Gb] de Ram y S.O. Windows 2003 Server. En la figura 5.1 se muestra un esquema del escenario para realizar las pruebas.

---

<sup>1</sup> Una prueba Web (página Web de prueba) está compuesta por una serie de solicitudes http, las cuales se utilizan en pruebas de rendimiento y en pruebas de carga excesiva.

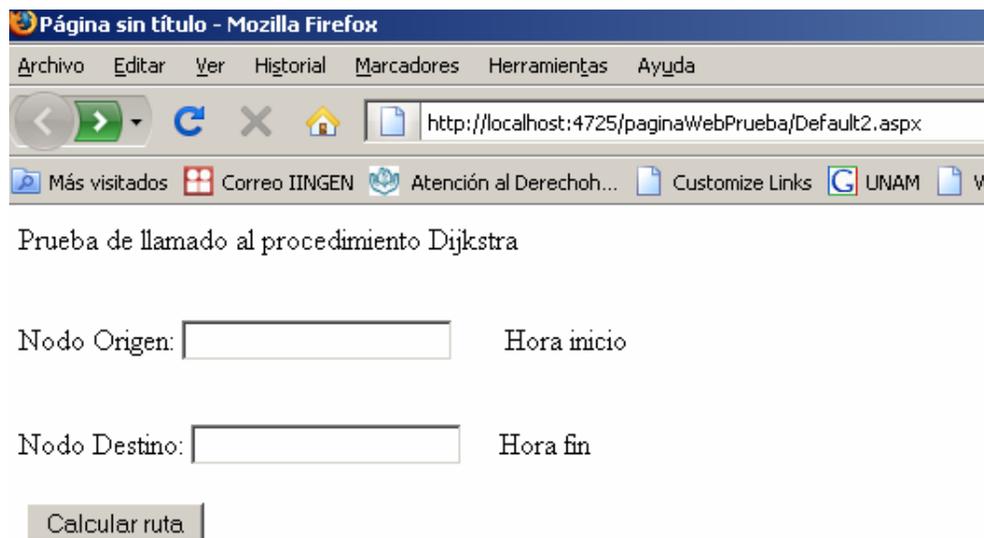


**Figura 5.1** Esquema de configuración del escenario del mejor caso para las pruebas de carga.

### 5.4.2 Creación de página Web de prueba

Se eligió realizar las pruebas de estrés con clientes Web debido a que en este entorno se ha definido como estándar de facto<sup>2</sup>, los tiempos de respuesta cortos menores a 1 minuto de espera, además de que es común que un enorme número de clientes se conecten por este medio.

En la página Web (ver figura 5.2) de prueba se tienen los campos “Nodo origen” y “Nodo destino”, que son los parámetros de entrada que recibe el procedimiento “Dijkstra” cuando la página se conecta a la base de datos.



**Figura 5.2** Página Web de prueba realizada con Visual Studio 2005, C sharp

Las etiquetas “hora inicio” y “hora fin” son para observar el tiempo de espera que le toma al usuario obtener una respuesta. La figura 5.3 muestra un ejemplo de una parte lo que el usuario obtendría como respuesta.

---

<sup>2</sup> Un **estándar de facto** es aquel patrón o **norma** que se caracteriza por no haber sido consensuada ni legitimada por un organismo de estandarización al efecto. Por el contrario, se trata de una norma generalmente aceptada y ampliamente utilizada por iniciativa propia de un gran número de interesados.



Figura 5.3 Parte de los resultados de la página Web de prueba.

Con el fin de evaluar los resultados obtenidos en los componentes de acceso a datos, se utilizó el monitor de rendimiento del S.O. para supervisar el rendimiento de ciertos contadores del servidor de datos. Los contadores de interés se encuentran en la tabla 5.2:

Objeto	Contador	Uso
Procesador	% de tiempo del procesador	La cantidad de tiempo que el procesador trabaja.
Memoria	Paginas / s	Número de veces por segundo que los datos se tienen que transferir de RAM al disco y viceversa.
Memoria	Bytes disponibles	La cantidad de RAM física disponible.
Disco	% tiempo de disco	La cantidad de tiempo que el disco está ocupado leyendo o escribiendo.
SqlServer Memory Manager	Memoria total del servidor (KB)	Cantidad total de memoria que es asignado dinámicamente a SQL Server

**Tabla 5.2** Contadores seleccionados para monitorear los recursos del sistema.

### ***5.4.3 Configuración de las herramientas de estrés seleccionadas***

Para realizar las pruebas de carga, se utilizó “Visual Studio Team Test Load Agent” de Visual Studio 2005 Team Edition. Se creó un proyecto de prueba de carga (ver figura 5.4), posteriormente se agregaron las pruebas Web al proyecto de prueba de carga para simular la apertura de varias solicitudes HTTP simultáneas por usuarios al servidor.

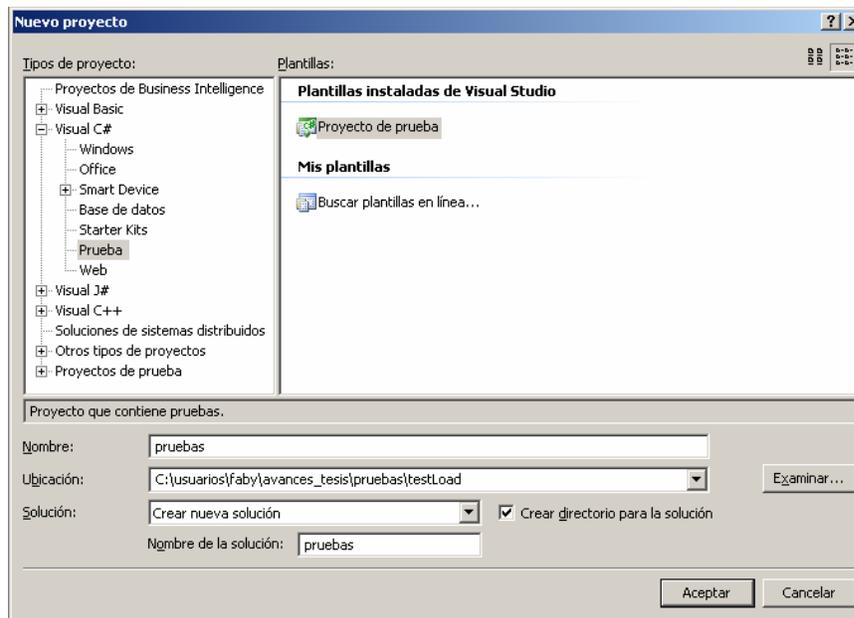


Figura 5.4 Creación del proyecto de prueba en Visual Studio 2005 Team Edition

### 5.4.3.1 Configuración de la carga de usuarios

Se eligió un escenario con una distribución normal centrada en tiempos de reflexión<sup>3</sup> grabados. Ver figura 5.5. El modelo de la carga fue elegido por pasos, ya que especifica una carga de usuarios que aumenta con el tiempo hasta una carga de usuarios máxima definida. En este caso se eligió una carga por pasos con un recuento inicial de usuarios de uno, un recuento máximo de usuarios de 50, una duración del paso de un segundo y un recuento de usuarios por pasos de uno. Ver figura 5.6.

---

<sup>3</sup> El tiempo de reflexión es el tiempo que dedica un usuario a examinar una página Web, que incluye ver la página y determinar la acción siguiente. No incluye el tiempo necesario para cargar una página.

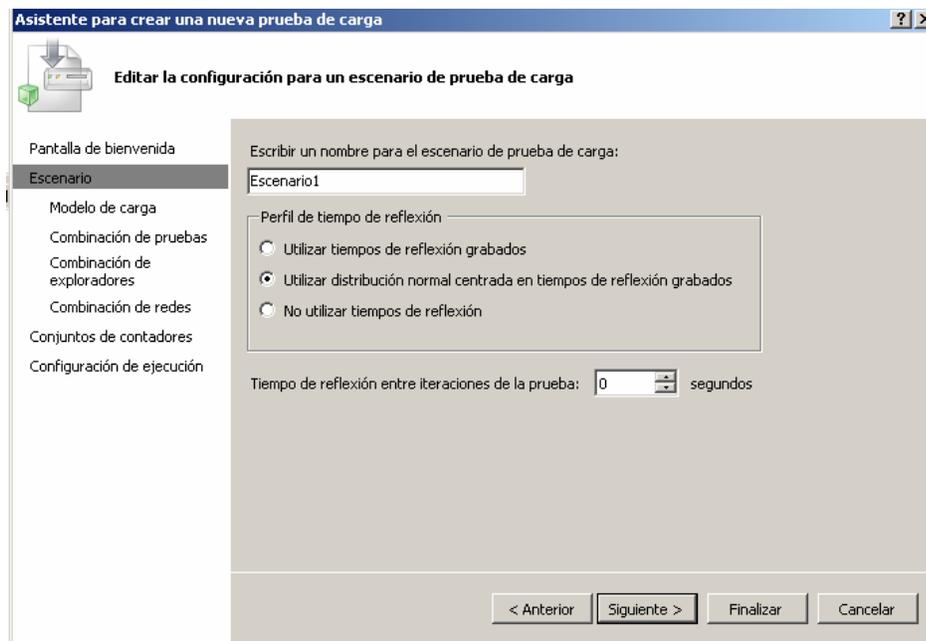


Figura 5.5 Configuración del escenario para la prueba de carga en Visual Studio 2005 Team Edition

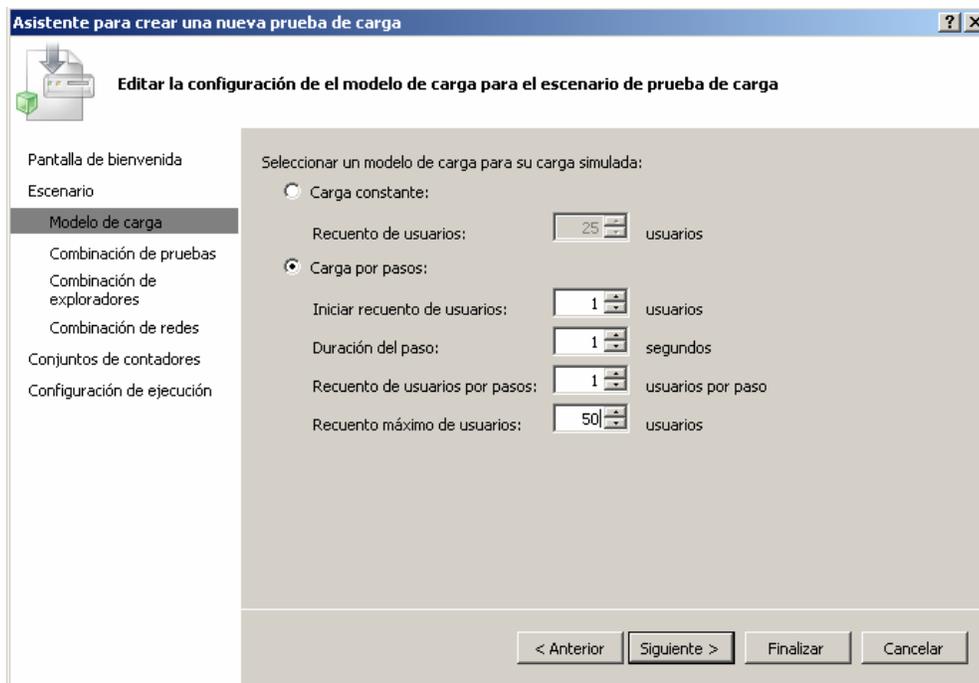


Figura 5.6 Carga por pasos; note que el recuento máximo de usuarios es de 50



Los resultados fueron almacenados en una tabla en la cual se registró la hora de inicio y la hora de salida de cada cliente virtual para su análisis posterior.

### 5.4.3.2 Resultados de las pruebas de carga

Fueron realizados varios escenarios agregando diferentes páginas Web de prueba, al proyecto de pruebas de carga. La selección de las páginas Web de prueba fue realizada con base en la variación del tiempo de ejecución (el tiempo necesario para encontrar las rutas, proporcionado un origen y un destino) desde menos de 2 segundos hasta más de 54 segundos, que es el tiempo de ejecución máximo en la muestra tomada de la tabla 5.1. En las figuras 5.9 y 5.10 se observa la tendencia mostrada en los diferentes escenarios al ir aumentando la carga de clientes virtuales.

En la figura 5.9 se muestra el tiempo de ejecución para una prueba de carga de 2 [seg] (Escenario 1) y en la figura 5.10 el tiempo de ejecución para una prueba de carga de 54 [seg] (Escenario 2).

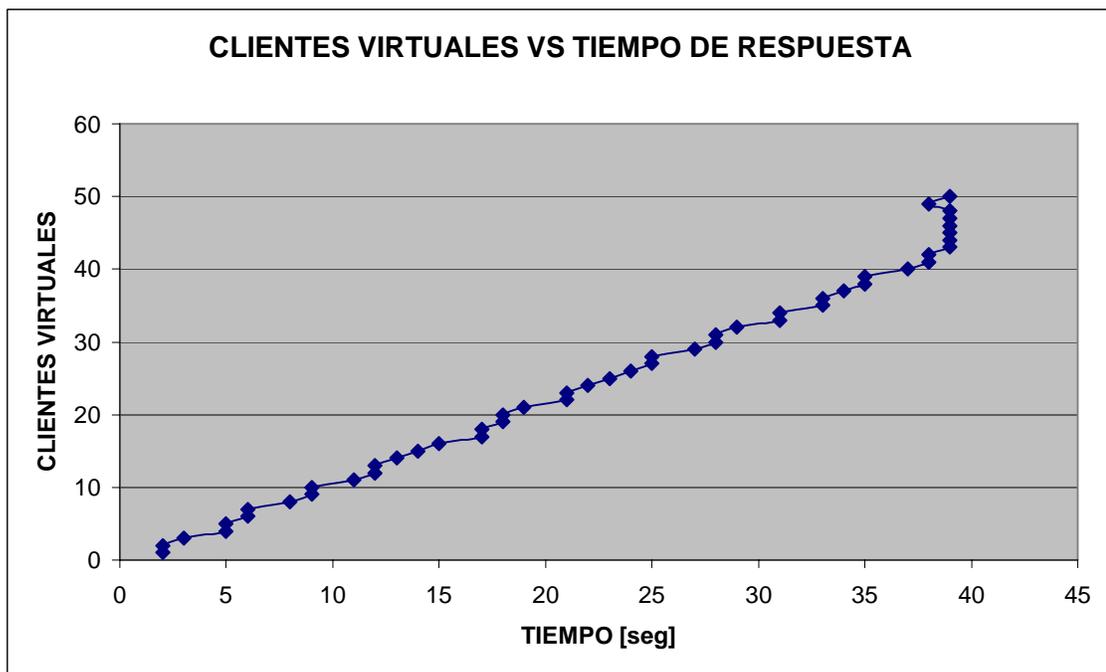
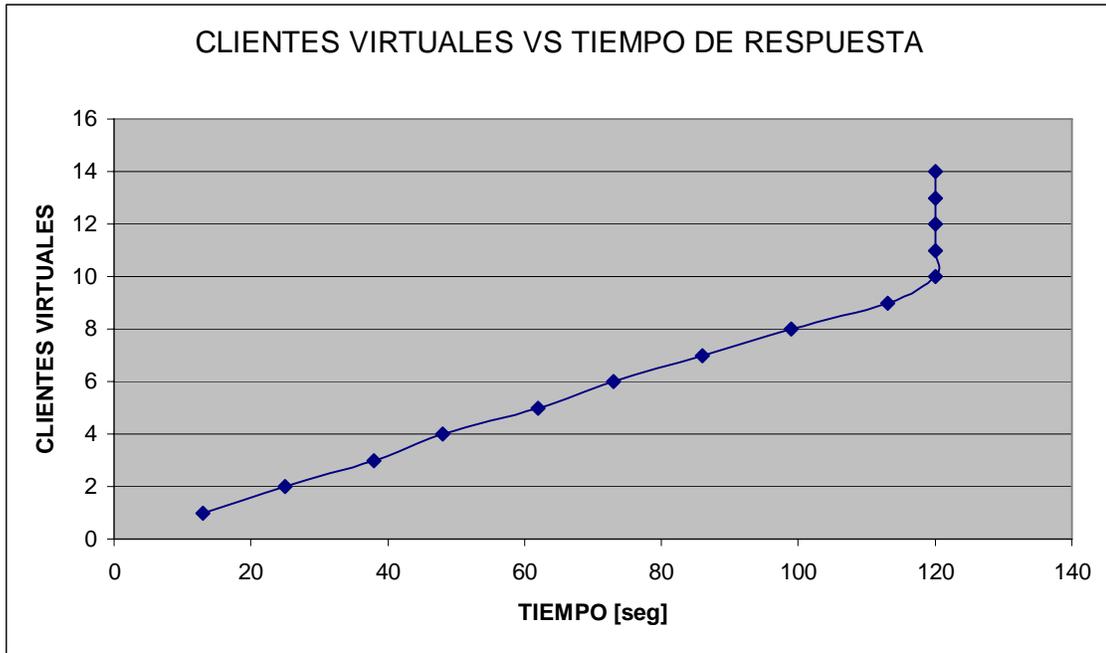


Figura 5.9 Tiempo de respuesta para un tiempo de ejecución de 2 [seg]



**Figura 5.10** Tiempo de respuesta para un tiempo de ejecución de 54 [seg]

Al conectarse un número de 50 clientes virtuales a la base de datos, los recursos que sobrepasaron su límite de rendimiento tolerable fueron: el %CPU, con más del 70%, y el contador SqlServer Memory Manager (cantidad total de memoria asignada dinámicamente a SQL Server) sobrepasando el 90%. A partir de estos recursos fue determinado el número de clientes adecuados para que el servidor de base de datos trabaje de manera eficiente.

Por otro lado, en el libro “Usabilidad, Diseño de Sitios Web”, el autor Jakob Nielsen (Jakob, 2000) establece que el tiempo máximo de respuesta que los usuarios pueden prestar atención mientras esperan obtener una respuesta por Internet es de 10 [seg]. Sin embargo, considerando una aplicación de este tipo (la cual requiere hacer operaciones de cálculos y búsquedas en una base de datos) es posible tomar como estándar de facto, un tiempo de respuesta que no sobrepase 60 [seg].

Tomando en cuenta los factores anteriores, se hizo una estimación del número máximo de usuarios, que puede soportar la base de datos, al usar la aplicación (algoritmo de Dijkstra implementado).

En el caso de la simulación del escenario 1 (prueba de carga con tiempo de ejecución de 2 [seg]), el número máximo de usuarios aceptados para un tiempo de respuesta menor a 60 segundos y con un %CPU menor a 70% fue de 20, mientras que para el escenario 2 (prueba de carga con tiempo de ejecución de 54 [seg]), fue de 7.

En términos generales, a partir de los resultados obtenidos de la simulación, se pudo estimar el número de usuarios que pueden acceder a la aplicación sin que los recursos del servidor y de base de datos lleguen a su límite, tomando en cuenta las características técnicas del equipo utilizado para hacer las pruebas y los tiempos máximos de ejecución que toma el algoritmo Dijkstra implementado.

Es importante mencionar que la velocidad de carga de los tiempos de respuesta obtenidos en las simulaciones de los dos escenarios, está relacionada con el rendimiento del servidor, la interacción con la base de datos, la velocidad del navegador y de la computadora del usuario, lo cual hace que el proceso de descarga sea aún más lento. Esto significa que cada uno de estos eslabones aporta su propia cuota de demora, y como las demoras son acumulativas, no es posible conseguir buenos tiempos de respuesta mejorando solamente algunas de las partes. El análisis de todos estos eslabones queda fuera del alcance de los objetivos de este trabajo.

## **Conclusiones**

El contexto en el cual se desarrolló la presente tesis, nace de la necesidad de encontrar posibles soluciones que ayuden a los usuarios a encontrar las mejores rutas en redes viales urbanas congestionadas como la de la Zona Metropolitana del Valle de México y las de muchas otras ciudades en el mundo, mediante el uso de nuevas tecnologías (Geoespaciales), las cuales han ayudado a la planificación y la gestión del tráfico en las vialidades.

La aportación principal de este trabajo es la implementación de un algoritmo de ruta mínima (en distancia, debido a la información disponible), con el objetivo de que pueda ser utilizado por distintas aplicaciones que tiene que ver con la recomendación de rutas, ya sea para que el usuario tome mejores decisiones sobre la ruta, o para mejorar el comportamiento del tráfico. Entre esas aplicaciones se encuentran los Sistemas de Información al Viajero que son Sistemas Inteligentes de Transporte y que actualmente son utilizados por equipos móviles, automóviles, entre otros.

La implementación del algoritmo de Dijkstra, presentada en esta tesis, permite obtener las distancias y los recorridos que traza la ruta más corta, desde distintos orígenes hacia un destino cualquiera, en la red vial de la ZMVM. Se puede decir que la implementación realizada con el uso del álgebra relacional en la capa de bases de datos, logró facilitar las tareas de búsqueda y ordenación de los nodos y arcos que conforman la red, además el algoritmo es sencillo, eficiente y fácil de implementar. Otra ventaja de implementar el algoritmo en la capa de bases de datos es la “transportabilidad”, ya que puede ser utilizado en cualquier gestor de bases de datos, sin importar la aplicación que se esté utilizando.

Existen otras formas de implementar Dijkstra con otro tipo de estructuras más complejas, que requieren de mayor tiempo y un análisis más especializado, por lo que queda abierta la propuesta de mejorar la implementación realizada.

La mayor labor consistió en reducir los tiempos de ejecución tanto como fue posible, mediante técnicas de programación y el uso de procedimientos almacenados en la capa de base de datos.

Aunque se logró un mejor resultado, en distancia de la ruta, con la implementación del algoritmo de Dijkstra que con el algoritmo utilizado por TransCAD, los tiempos de ejecución fueron mayores. Sin embargo, en el área de redes de transporte a veces es necesario sacrificar tiempos de ejecución, para obtener una mejor ruta en aquellas situaciones en las que se requiere optimizar costos, como la entrega de pedidos y la distribución de mercancías. Así que la implementación realizada puede ser muy útil en la solución de dichos problemas.

La recomendación principal atañe al área de redes de computadoras, ya que si se utiliza la implementación vía Web, se necesita una máquina con suficientes recursos (memoria, procesador, etc) donde se coloque el gestor de bases de datos, con el fin de obtener mejores resultados en tiempos de respuesta.

Finalmente, la implementación desarrollada puede servir para otro tipo de aplicaciones como una subrutina de problemas más complejos, tales como el análisis de distribución de flujos en la red, asignación de tráfico, diseño de rutas de vehículos, etc.

## REFERENCIAS

Acha A, J. Espinosa; “Hacia una Arquitectura Nacional para los Sistemas Inteligentes de Transporte”; Secretaría de Comunicaciones y Transportes, publicación técnica No. 251, Sanfandila, Qro, 2004, <[www.imt.mx/Espanol/Publicaciones/pubtec/pt251.pdf](http://www.imt.mx/Espanol/Publicaciones/pubtec/pt251.pdf)> [fecha de consulta: 20 febrero, 2008].

Backhoff A, J. Carlos; “El Sistema de Información Geoestadística para el Transporte”; Secretaría de Comunicaciones y Transportes, publicación Técnica No.207; Sanfandila, Qro, 2002, <[www.imt.mx/Espanol/Publicaciones/pubtec/pt207.pdf](http://www.imt.mx/Espanol/Publicaciones/pubtec/pt207.pdf)>, [fecha de consulta: 15 febrero, 2008].

CONAPO; “Programa Nacional de Población 2001-2006”;CONAPO,2001; <[www.conapo.gob.mx/publicaciones](http://www.conapo.gob.mx/publicaciones)> (5 Diciembre, 2007).

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid; “Sistemas de Transporte Inteligente y Vehículos Inteligentes”; <<http://turan.uc3m.es/uc3m/dpto/IN/dpin04/ISL/STI.html>> (19 Febrero, 2008)

Environmental Systems Research Institute, ESRI; “The Guide to Geographic Information Systems”; <<http://www.esri-es.com/>> (5 Mayo, 2008)

G. Brassard, P. Bratley; “Fundamentos de algoritmia”; Prentice Hall, Madrid 1997.

INEGI; “Estadísticas del Medio Ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana”; INEGI,2005;<[http://www.inegi.gob.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/sociodemografico/medioambdf/2002/archivo9.pdf](http://www.inegi.gob.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/sociodemografico/medioambdf/2002/archivo9.pdf)>.[fecha de consulta: 15 Marzo, 2008].

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt; “Los Sistemas de Información Geográfica”; <<http://www.humboldt.org.co/humboldt/mostrarpagina.php?codpage=70001>>(6 Mayo, 2008)

Jacobson, I.; Booch, G.; Rumbaugh J.; “El Proceso Unificado de Desarrollo de Software”; Pearson Educación S.A., Madrid 2000.

Jean-Claude; “Geographic Information Systems in Transportation Research”; Pergamon, Oxford 2000.

Jukka K. Nurminen; “Using software complexity measures to analyze algorithms—an experiment with the shortest-paths algorithms”; Department of Information Science, Jiangsu Polytechnic University, China, 2001; <<http://www.sciencedirect.com>> [Fecha de consulta: 5 Diciembre, 2007]

Lozano A, F. Granados, J. Antún; “El transporte particular y los problemas de congestión”; Laboratorio de Transportes y Sistemas Territoriales (LTST), México, 2005.

Lozano A, F. Granados, J. Antún; “Estudio Integral Metropolitano de Transporte de Carga y Medio Ambiente para el Valle de México (EIMTC-MAVM)”;

Laboratorio de Transportes y Sistemas Territoriales (LTST), informe final, México, 2006.

Microsoft Corporation. “Tutorial de SQL Server 2005 Analysis Services”. <[http://technet.microsoft.com/es-es/library/default\(TechNet.10\).aspx](http://technet.microsoft.com/es-es/library/default(TechNet.10).aspx)> .

M.H.Xu, Y.Q.Liu; “An improved Dijkstra’s shortest path algorithm for sparse network”; Department of Information Science, Jiangsu Polytechnic University, China, 2006; <<http://www.sciencedirect.com>> [Fecha de consulta: 5 Diciembre, 2007].

National Center for Geographic Information and Analysis, NCGIA; <<http://www.ncgia.ucsb.edu/>> (10 Abril, 2008).

Nielsen Jakob; “Usabilidad, Diseño de Sitios Web”; Anaya, Madrid 2006.

Partida Bush Virgilio, Anzaldo Gómez Carlos; “Escenarios demográficos y urbanos de la zona metropolitana del valle de México”; CONAPO, 2003; [www.conapo.gob.mx/publicaciones/2003/04.pdf](http://www.conapo.gob.mx/publicaciones/2003/04.pdf) [fecha de consulta: 10 Marzo, 2008].

Robert Vieira; “Beginning SQL Server™ 2005 Programming”; Wrox, United States of America, 2006.

SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE (SMA); “Informe climatológico ambiental del valle de México”; Octubre 26, 2001; <[http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/informe\\_climatologico\\_ambiental\\_cuenca\\_valle\\_mexico.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/informe_climatologico_ambiental_cuenca_valle_mexico.pdf)> [fecha de consulta: Junio, 2008].

SETRAVI; “Vialidades, las venas de la ciudad”; SETRAVI, 2008; <[http://www.setravi.df.gob.mx/reportajes/r\\_vialidades.html](http://www.setravi.df.gob.mx/reportajes/r_vialidades.html)> (5 Febrero, 2008).

Sin autor; “El Sistema de Tecnología Inteligente de Transporte Inteligente del Sur de la Florida”; <[http://www.sunguide.org/docs/esp/itsarticle1\\_spanish.pdf](http://www.sunguide.org/docs/esp/itsarticle1_spanish.pdf)> (5 Marzo, 2008).

Thomas H. Cormen, Chales E. Leiserson, Ronald L. Rivest; “Introduction to Algorithms”; Mitt Press, United States of America 2003.

Torres V; “Consecuencias e interacciones del desarrollo reciente de la Ciudad de México y su red vial”; Tesis de Maestría en Urbanismo, UNAM, 2006.

## **ANEXO:**

### **SCRIPTS PARA LA CREACIÓN DE TABLAS DE LA BASE DE DATOS “ZMVM”**

Las tablas “redCargaNodos” y “redCargaArcos” fueron exportadas de la base de datos que tiene el Sistema de Información Geográfica para el transporte de carga, del Laboratorio de Transporte y Sistemas Territoriales del Instituto de Ingeniería.

#### **Script de Tabla importada redCargaArcos**

```
CREATE TABLE redCargaArcos(  
    oid int NOT NULL PRIMARY KEY,  
    geometria varbinary(max) NULL,  
    ID bigint NULL,  
    LENGTH float NULL,  
    DIR smallint NULL,  
    NOMBRE varchar(4000) NULL,  
    FROM_ID bigint NULL,  
    TO_ID bigint NULL,  
    geometria_Envelope_MinX float NULL,  
    geometria_Envelope_MinY float NULL,  
    geometria_Envelope_MaxX float NULL,  
    geometria_Envelope_MaxY float NULL )
```

```
ALTER TABLE redCargaArcos WITH CHECK ADD CONSTRAINT  
enforce_srid_redCargaArcos_geometria CHECK (geometria IS NULL OR ST.SRID(geometria)=(26714))
```

#### **Script de Tabla importada redCargaNodos**

```
CREATE TABLE redCargaNodos(  
    oid int NOT NULL,  
    geometria varbinary(max) NULL,  
    ID bigint NOT NULL PRIMARY KEY,  
    LONGITUDE] bigint NULL,  
    LATITUDE] bigint NULL,
```

```
geometria_Envelope_MinX float NULL,  
    geometria_Envelope_MinY float NULL,  
    geometria_Envelope_MaxX float NULL,  
    geometria_Envelope_MaxY float NULL)
```

**ALTER TABLE** redCargaNodos WITH CHECK ADD **CONSTRAINT**

enforce\_srid\_redCargaNodos\_geometria CHECK (geometria IS NULL OR ST.SRID(geometria)=(26714))

### **Creación de la tabla Nodos noAsignados**

**CREATE TABLE** Nodos\_noAsignados(  
 nodo bigint NOT NULL ,  
 d float NULL,  
 predecesor bigint NULL,  
 oid int NULL,  
 id bigint NULL,  
 nombre varchar(400) NULL )

**ALTER TABLE** Nodos\_noAsignados

ADD **CONSTRAINT** PK\_Nodos\_noAsignados **PRIMARY KEY** (nodo,oid)

**ALTER TABLE** Nodos\_noAsignados

ADD **CONSTRAINT** FK\_Nodos\_noAsignados\_red\_Carga\_nodos **FOREIGN KEY**(nodo) **REFERENCES**  
redCargaNodos (oid) ON DELETE CASCADE

**ALTER TABLE** Nodos\_noAsignados

ADD **CONSTRAINT** FK\_Nodos\_noAsignados\_Nodos\_vecinos **FOREIGN KEY**(oid)  
**REFERENCES** Nodos\_vecinos (oid) ON DELETE CASCADE

### **Creación de la tabla NodosAsignados**

**CREATE TABLE** NodosAsignados(  
 nodo bigint NOT NULL,  
 min\_distancia float NULL,  
 predecesor bigint NULL,  
 oid int NULL,

id bigint NULL,  
nombre varchar(4000) NULL)

**ALTER TABLE** NodosAsignados  
ADD **CONSTRAINT** PK\_Nodos\_Asignados **PRIMARY KEY** (nodo,oid)

**ALTER TABLE** NodosAsignados  
ADD **CONSTRAINT** FK\_Nodos\_Asignados\_Nodos\_noAsignados **FOREIGN KEY**(nodo)  
**REFERENCES** Nodos\_noAsignados (nodo) ON DELETE CASCADE

**ALTER TABLE** NodosAsignados  
ADD **CONSTRAINT** FK\_Nodos\_noAsignados\_Nodos\_noAsignados **FOREIGN KEY**(oid) **REFERENCES**  
Nodos\_noAsignados (oid) ON DELETE CASCADE

### **Creación de la tabla Nodos vecinos**

**CREATE TABLE** Nodos\_vecinos(  
from\_id int NULL,  
to\_id int NULL,  
lenght float NULL,  
oid int NOT NULL,  
id bigint NOT NULL,  
nombre varchar(4000) NULL)

**ALTER TABLE** Nodos\_vecinos  
ADD **CONSTRAINT** FK\_nodos\_vecinos\_redCargaArcos **FOREIGN KEY**(oid)  
**REFERENCES** redCargaArcos (oid) ON DELETE CASCADE

### **Creación de la tabla RUTA MINIMA**

**CREATE TABLE** RUTA\_MINIMA(  
nodo bigint NOT NULL,  
min\_distancia float NULL,  
predecesor bigint NULL,  
oid int NULL,  
id bigin] NOT NULL,  
nombre varchar(4000) NOT NULL)

```
ALTER TABLE RUTA_MINIMA  
ADD CONSTRAINT PK_ RUTA_MINIMA PRIMARY KEY (nodo,oid)
```

```
ALTER TABLE RUTA_MINIMA  
ADD CONSTRAINT FK_ RUTA_MINIMA _ Nodos_Asignados FOREIGN KEY(nodo) REFERENCES  
Nodos_Asignados (nodo) ON DELETE CASCADE
```

```
ALTER TABLE RUTA_MINIMA  
ADD CONSTRAINT FK_ RUTA_MINIMA _ Nodos_Asignados FOREIGN KEY(oid) REFERENCES  
Nodos_Asignados (oid) ON DELETE CASCADE
```

## GLOSARIO

**Aforos vehiculares:** Conteo de vehículos que circulan en determinada vialidad.

**Bucket:** Algoritmo de ordenamiento de objetos, que corre en tiempo real cuando se toma una distribución uniforme.

**Cota ajustada asintótica:** Función que sirve de cota tanto superior como inferior de otra función cuando el argumento tiende a infinito. Notación  $\Theta(g(x))$ , funciones acotadas por la función  $g(x)$ .

**Cota inferior asintótica:** Función que sirve de cota inferior de otra función cuando el argumento tiende a infinito. Notación  $\Omega(g(x))$ , funciones acotadas inferiormente por la función  $g(x)$ .

**Heap:** El ordenamiento por montículos (Heap sort en inglés) es un algoritmo de ordenación no recursivo, no estable, con complejidad computacional  $O(n \log n)$ .

**Matriz origen-destino:** Número de viajes realizados de cada zona origen a cada destino en un periodo de tiempo.

**Notación asintótica:** Trata del comportamiento de funciones en el límite, esto es, para valores suficientemente grandes de su parámetro.

**Orden de Complejidad:** Es una familia de funciones que comparten un mismo comportamiento asintótico. Estas familias se designan con  $O(\cdot)$ .

**Tiempo de ejecución:** Es medido por el número de operaciones elementales o pasos ejecutados.

**Viajes/persona/día:** Cantidad de movimientos realizados por indeterminado número de personas durante un día, en un modo de transporte. Esta cifra no corresponde al número de usuarios transportados.

**Vialidad:** Conjunto integrado de vías de uso común que conforman la traza urbana de la ciudad, cuya función es facilitar el tránsito eficiente y seguro de personas y vehículos.

**Vías de Circulación Continua Perimetral:** Dispuestas en anillos concéntricos que intercomunican la estructura vial en general;

**Vías Primarias:** Espacio físico cuya función es facilitar el flujo del tránsito vehicular continuo o controlado por semáforo, entre distintas zonas de la Ciudad, con la posibilidad de reserva para carriles exclusivos, destinados a la operación de vehículos de emergencia.

**Vías Principales:** Vías que por sus características geométricas y su capacidad para mover grandes volúmenes de tránsito, enlazan y articulan gran cantidad de viajes-persona-día. Estas vialidades complementan la estructura de la red vial primaria y se caracterizan por su continuidad y sección transversal constante; este tipo de vialidades varían en su trazo y condiciones de operación de acuerdo a la zona geográfica en que se ubican

**Vías Secundarias:** Espacio físico cuya función es facultar el flujo del tránsito vehicular no continuo, generalmente controlado por semáforos entre distintas zonas de la Ciudad.