

9  
20'

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERIA**



**PLANEACION DE LA CONSTRUCCION DE CARRETERAS  
UTILIZANDO PROGRAMACION LINEAL**

**TESIS PROFESIONAL**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

Ingeniero Mecánico Electricista

P R E S E N T A

EUGENIA APARICIO MIJARES

MAURICIO PERALTA MAYORGA

Director de Tesis: Dr. Jesús Acosta Flores

MEXICO, D. F.

1980.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## INDICE

|   |    |
|---|----|
| Introducción  | 3  |
| I. Importancia, Historia y Planeación del Transporte Carretero en México                              | 7  |
| I.1. Importancia del Transporte   | 7  |
| I.1.1. Función Económica del Transporte   | 7  |
| I.1.2. Función Social del Transporte  | 8  |
| I.1.3. Función Política del Transporte  | 9  |
| I.2. Historia del Transporte Carretero en México  | 9  |
| I.2.1. Historia del Transporte Carretero durante el Virreinato  | 10 |
| I.2.2. Historia del transporte Carretero desde 1621 hasta 1988  | 11 |
| I.3. Planeación del Transporte Carretero en México  | 17 |
| II. Planteamiento del Problema  | 23 |
| II.1. Red Carretera Analizada   | 23 |
| II.2. Modelo de Programación Lineal de Asignación de Flujos de Tránsito                               | 27 |
| II.3. Cálculo de los Parámetros del Modelo de Programación Lineal de Asignación de Flujos de Tránsito | 34 |
| II.4 Evaluación de los Proyectos  | 36 |

|   |    |
|---|----|
| III. Solución al Problema Planteado     | 38 |
| III.1. Cálculo de Parámetros del Modelo | 38 |
| III.2. Evaluación de Proyectos          | 61 |
| IV. Conclusiones y Comentarios Finales  | 71 |
| V. Bibliografía                         | 75 |

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico, social, político y cultural de todo país va de la mano con el desarrollo de su sistema de transporte carretero.

Las carreteras son el sistema circulatorio de todo país; a través de ellas se desplazan personas y bienes.

Los proyectos de ampliación, modernización y construcción de nuevas carreteras generan fuertes gastos y es por esto que se debe disponer de una metodología que permita planear adecuadamente la implementación de tales proyectos.

El objetivo de esta tesis es el de proponer una metodología para planear proyectos de ampliación y/o construcción de carreteras, comparando los gastos de inversión de estos proyectos con los ahorros en los costos de operación de los vehículos que se obtendrán como consecuencia de la implementación de tales proyectos.

Los costos de operación en que se incurre al utilizar una carretera se pueden dividir en cuatro tipos: a) Costos de mantenimiento, b) Costos de operación, c) Tiempos y d) Accidentes.

Estos costos serán altos o bajos, según sean los niveles de servicio ofrecidos en la red carretera. Mejorando estos niveles de servicio mediante ampliaciones, modernizaciones y construcciones de nuevos arcos carreteros, se generarán ahorros en los costos de operación.

Un proyecto será conveniente siempre y cuando los ahorros que genere sean mayores que los costos de inversión que significa su implementación.

Proponemos en esta tesis la utilización de un modelo de programación lineal de asignación de flujos de tránsito como herramienta para la planeación de proyectos de inversión en carreteras.

Este modelo permite satisfacer las demandas de transporte por carreteras entre diversas ciudades, minimizando los costos de operación de los vehículos que circulan por ellas.

Para cumplir con el objetivo de esta tesis, la hemos dividido en cuatro capítulos.

En el primero (Importancia, Historia y Planeación del Transporte en México) incluimos algunos aspectos relativos a la importancia y a las funciones que desempeña en cualquier país el sistema de transporte carretero. Luego hacemos una pequeña descripción de la historia y del desarrollo de este sistema de transporte en México, resaltando los acontecimientos más importantes ocurridos desde los tiempos del virreinato hasta nuestros días. Además, se hace mención del Esquema Director del Transporte Carretero, que es el documento base en materia de planeación de carreteras en México de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

En el segundo capítulo, llamado Planteamiento del Problema, mencionamos la red carretera a analizar y sus características físicas, geométricas y de flujos de tránsito sobre la cual centraremos nuestro análisis. En este capítulo también se describe detalladamente el modelo de programación lineal utilizado, mencionando las variables y los parámetros que contiene y la forma para calcular estos últimos. Se realiza asimismo una descripción de la metodología a seguir para comparar los costos de inversión en proyectos de ampliación y/o construcción de carreteras con los ahorros en los costos de operación que de ellos se obtengan.

En el tercer capítulo (Solución al Problema Planteado), se desarrolla todo lo descrito en el capítulo anterior, obteniendo el modelo de la red estudiada, cuantificando los costos de operación, proponiendo proyectos alternativos para disminuir estos costos, cuantificando estos ahorros y evaluando la conveniencia de esos proyectos. En este capítulo se proponen varios proyectos que evitarán la saturación de las carreteras de la red analizada; entre ellos se escoge al que genera mayores ahorros en los costos de operación, y se realiza un análisis económico en un horizonte de 15 años para evaluar la conveniencia de su implementación.

En el último capítulo (Conclusiones y Comentarios Finales).

se explican las ventajas y desventajas de la metodología propuesta en esta tesis, haciendo mención, además, de que nuestro análisis incluye nada más el punto de vista económico, y que además de este se deben tener en cuenta puntos de vista sociales, políticos y culturales para la evaluación integral de estos proyectos de inversión en las carreteras del país.



# I. IMPORTANCIA, HISTORIA Y PLANEACION DEL TRANSPORTE CARRETERO EN MEXICO

## I.1. IMPORTANCIA DEL TRANSPORTE

La desigual distribución de los recursos materiales y humanos en la sociedad humana es el factor que genera la traslación. Si cada individuo fuese completamente autosuficiente, no requeriría viajar de un lado a otro, ni transportar satisfactores. El transporte nace de la necesidad de cambiar la ubicación de las personas, los objetos y las expresiones del pensamiento, para que la sociedad subsista, funcione y evolucione.

Las funciones y efectos del transporte son de carácter económico, político y social.

### I.1.1. FUNCION ECONOMICA DEL TRANSPORTE.

Como se mencionó anteriormente, la necesidad de trasladarse de un punto a otro surge de la desigual distribución de los recursos naturales en un país. Para que una sociedad subsista y se desarrolle, necesita producir determinados bienes y comercializar otros. El transporte representa el sistema circulatorio de cualquier país, ya que por medio de él se distribuyen los productos y materias primas necesarios para

mantener activo su aparato productivo. Mediante el transporte, los bienes materiales adquieren valor. Para ejemplificar esto, basta mencionar que una tonelada de mineral de hierro en una mina no es útil para una planta siderúrgica, pero sí lo es cuando está disponible en sus instalaciones. Al transportar la materia prima (mineral de hierro) desde la mina hasta la fábrica, ésta adquiere mayor utilidad.

### 1.1.2. FUNCION SOCIAL DEL TRANSPORTE.

Nuestro siglo se ha caracterizado por la existencia de grandes urbes en los países más industrializados del mundo. Esto ha traído como consecuencia graves problemas relacionados con la centralización de la vida económica, política y cultural de estos países. La tendencia actualmente es descentralizar estas actividades, propiciando que sean más ciudadanos los que disfruten de los bienes materiales y culturales generados en el país. En este sentido, el transporte adquiere especial importancia, ya que, para generar polos atractivos de desarrollo dentro del territorio nacional, es esencial que cuenten con vías adecuadas y eficientes de acceso y de comunicación con el resto de las demás ciudades. A través de las carreteras pueden llegar a cualquier rincón del país educación, asistencia social, atención médica, productos terminados, materias primas y la transmisión de

los valores y principios culturales que posibilitan el desarrollo de una identidad nacional que una a todos los habitantes de un determinado país.

### I.1.3. FUNCIÓN POLITICA DEL TRANSPORTE.

Entre las funciones políticas del transporte se observa que facilita la función del gobierno por parte de una actividad central y promueve la aplicación uniforme de la ley y de la justicia y la distribución equitativa de los bienes de la nación.

El transporte expresa en el territorio el proyecto político de una nación. En este sentido, una red radial de ferrocarriles o carreteras expresa una tendencia al centralismo.

El financiamiento del transporte también implica juicios políticos. Dados los elevados costos del desarrollo de instalaciones y tecnología para el transporte, es importante analizar el origen de los fondos utilizados para estos propósitos.

### I.2. HISTORIA DEL TRANSPORTE CARRETERO EN MEXICO.

La historia de la evolución de México está vinculada estrechamente con el desarrollo de sus medios de comunicación, estableciéndose en la escala del tiempo una correlación directa

entre la creciente extensión y eficiencia de dichos medios y el crecimiento de México en todos los aspectos de la vida nacional.

### 1.2.1. HISTORIA DEL TRANSPORTE CARRETERO DURANTE EL VIRREINATO.

El virreinato favoreció únicamente aquellos caminos que más convenían a la política de explotación y exportación de la riqueza minera del país y a la necesidad de mantener el control político y militar sobre el territorio. En consecuencia, concentró la atención en cuatro largos y sinuosos caminos troncales dirigidos hacia los puntos cardinales y los mantuvo en las condiciones mínimas de transitabilidad para poder transportar soldados y armas de la Corona donde fuese necesario someter a los indios.

A principios del siglo XIX, como saldo de tres siglos de dominación española, el país tenía solamente 2 300 kilómetros de esta clase de carreteras, que en la suma de las siguientes:

México - Veracruz:

El cordón umbilical con España

México - Acapulco:

Cauce por el cual pasaba la riqueza de Oriente en tránsito para Europa

|                   |  |
|-------------------|--|
| México - Oaxaca:  | Que se extendía hacia el Sureste   |
| México - Santa Fe | De este camino se desprendían los ramales a Valladolid, Guadalajara, San Luis Potosí y Monterrey |
| México - Toluca:  | Construido a fines del siglo XVIII   |

### 1.2.2. HISTORIA DEL TRANSPORTE CARRETERO DESDE 1621 HASTA 1900

Desde la Independencia hasta las leyes de Reforma, no se agregó un kilómetro más a la red carretera del país, pero en el decenio comprendido entre 1856 y 1876, el gobierno federal construyó 9 500 kilómetros adicionales de caminos.

Juárez dio pasos firmes para hacer realidad la construcción de la primera línea férrea en el territorio nacional dando comienzo a la construcción del Ferrocarril Mexicano a Veracruz inaugurado el 10. de enero de 1873 por Sebastián Lerdo de Tejada.

En el lapso comprendido entre 1925 y 1934, inicia la Comisión Nacional de Caminos (CNC) sus labores con la construcción de las carreteras México-Puebla, México-Pachuca y México-Cuernavaca, para cuyos proyectos y ejecución hubo de contratarse a una empresa norteamericana (Byrne Brothers Corp.).

En 1930, el desarrollo de la red de caminos era de 1 426 kilómetros. Ya se habían terminado los caminos México-Córdoba, México-Pachuca, México-Iloilo, México-Acapulco, un tramo de la carretera Monterrey-Laredo, Mérida-Progreso y Mérida-Unichén Itzá. Durante el lapso comprendido entre 1925 y 1934, se construyeron 4 260 kilómetros de carretera. De 1928 en adelante, los caminos han sido proyectados, construidos y conservados exclusivamente por ingenieros y compañías constructoras nacionales.

En 1940, la red de carreteras alcanzó un total de casi 10 000 kilómetros, de los cuales la mitad estaban pavimentados y una tercera parte revestidos. Los principales caminos terminados hasta su pavimentación fueron los de: México-Laredo, México-Veracruz (vía Jalapa), México-Guadalajara y Puebla-Oaxaca; también quedaron terminados el camino Monterrey-Saltillo y el tramo Ciudad Juárez-Chihuahua; el camino México-Veracruz (vía Tehuacán) se terminó hasta Córdoba.

Un paso de gran significación fue el establecimiento de una política de cooperación con los estados (en 1934) para la complementación de la red de caminos federales mediante la construcción de caminos estatales y vecinales, alimentadores de los caminos troncales, aportando el 50% de su costo la Federación y el 50% los estados.

En el periodo de 1940-1946, a un ritmo de más de 1 000 kilómetros por año, se construyeron 8 615 kilómetros de carreteras, entre las cuales deben mencionarse las de Oaxaca-Tuxtla Gutiérrez, México-Ciudad Juárez, Guaymas-Hermosillo-Nogales, Córdoba-Veracruz, Tepic-Mazatlán y Campeche-Mérida.

Durante 1947-1952 se construyeron 4 623 kilómetros de caminos, entre los cuales debe anotarse la carretera transistmica, la de Alvarado a Acayucan, los caminos de la cuenca del Papaloapan, la pavimentación de la carretera Panamericana en el trayecto Oaxaca-Tuxtla Gutiérrez, la Supercarretera México-Nogales y el tramo Texcoco-Apizaco-Huamantla-Zaratepec, con el cual se acortó la distancia a Jalapa y Veracruz.

En el periodo 1953-1968 el organismo descentralizado denominado Caminos y Puentes Federales de Ingresos se conformó. Actualmente, con las modificaciones de 1963, funciona con el nombre de Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos.

En caminos, se terminaron 2 027.6 kilómetros de terracerías, 1 839 kilómetros de obras de drenaje, 2 679.5 kilómetros de revestimientos y 2 938.6 kilómetros de pavimentos. Además, por cooperación con los estados, se construyeron 5 117 kilómetros de terracerías y 4 525.6 kilómetros de pavimentos.

En el periodo 1968-1964 se construyó la carretera de cuota a

Puebla, para responder a las exigencias del tránsito intenso turístico y comercial, y se lograron avances importantes en la integración de nuevos ejes troncales, especialmente en los del Pacífico y del Golfo.

Durante el período 1964-1970, la construcción de carreteras se caracterizó por una atención preferente a la extensión y ampliación de las troncales de peaje. Entre las obras que deben destacarse se encuentran la construcción del trazo Puebla-Orizaba-Córdoba, la duplicación de carriles en el camino México-Querétaro, la extensión Querétaro-Irapuato, la carretera turística Tijuana-Ensenada y el trazo Guadalajara-Zapotlanejo.

El total de longitud de la red se aproximó a 72 000 kilómetros para fines de 1969.

Durante la etapa de 1970-1976 se construyó un total de 30 000 kilómetros de caminos de mano de obra.

Pasaron el control de la Secretaría de Obras Públicas 30 000 kilómetros de caminos construidos por diversas dependencias como Petróleos Mexicanos y Comisión Federal de Electricidad, sumándose a la red de caminos alimentadores. El total de caminos alimentadores subió así a 66 000 kilómetros transitables y 147 500 kilómetros de caminos de tierra y brechas. Además, se construyeron libramientos alrededor de muchas poblaciones que antes eran cruzadas obligatoriamente por las carreteras.



Al terminar este periodo, el sistema carretero mexicano contaba con 79 500 kil6metros de caminos federales, 60 000 kil6metros de caminos alientadores, 45 000 kil6metros de caminos vecinales y 1 000 kil6metros de caminos de cuota.

La crisis econ6mica que desat6 la devaluaci6n de 1976 oblig6 al gobierno a dr6sticos recortes del presupuesto de construcci6n del gobierno federal.

sin descuidar la conservaci6n normal de la red, se construyeron 2 601 kil6metros de caminos federales, 12 548 de caminos estatales y 19 539 de caminos rurales.

Por medio del transporte carretero se movieron, de 1983 a 1988, el 97% del tr6fico interurbano de pasajeros, el 70% del total de carga transportada por via terrestre y el 57% del total de carga manejada por todos los modos, magnitudes que sitúan a este subsector como el de mayor participaci6n en el movimiento nacional de carga y pasajeros.

Se construyeron y se pusieron en operaci6n en ese periodo 20 terminales de pasajeros y seis centrales de carga y se alcanz6 con ello un total de 96 y 39 de estas instalaciones respectivamente en todo el país.

En cuanto a la infraestructura carretera, la evoluci6n que esta experiment6 en este periodo se puede apreciar en la gr6fica 1.1.

| TOTALES                | 213.7 | 214.1 | 211.8 | 224.2 | 229.7 | 236.4 | 233.7 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MILLONES DE KILOMETROS | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   |
|                        | 85.0  | 88.4  | 90.4  | 91.3  | 93.3  | 96.2  | 93.4  |
|                        | 93.1  | 93.1  | 93.4  | 96.3  | 99.6  | 99.2  | 99.7  |
|                        | 43.7  | 44.2  | 44.6  | 44.4  | 44.9  | 44.7  | 45.2  |
|                        | 38.1  | 29.4  | 29.4  | 31.4  | 29.4  | 29.4  | 32.5  |
|                        | 0.9   | 0.9   | 1.0   | 0.9   | 0.9   | 0.9   | 0.9   |
|                        | 1992  | 1993  | 1994  | 1995  | 1996  | 1997  | 1998  |

= DATOS ESTIMADOS

Fuente: El Transporte en México  
SCT  
1998

- 1- Caminos Federales de Cuota
- 2- Derechos
- 3- Carreteras Libres Federales
- 4- Carreteras Estatales y Caminos Vecinales
- 5- Caminos Rurales

Gráficos 1.1. Evolución del  
Transporte Carretero en México

### 1.3. PLANEACIÓN DEL TRANSPORTE CARRETERO EN MEXICO.

A principios de esta década, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes creó un esquema director para la planeación del desarrollo futuro de las carreteras en el país. Este esquema director consta principalmente de un pronóstico de demanda del transporte y de un estudio acerca de la oferta que en materia de infraestructura carretera debe ofrecerse para satisfacer a la demanda pronosticada con niveles de servicio aceptables.

El objetivo del esquema es determinar para varios escenarios alternos de evolución de la demanda a mediano y largo plazos, los siguientes aspectos de interés:

1. Las capacidades necesarias en los tramos de la red troncal y los montos de inversión.
2. Los costos de operación que se tendrán en el conjunto de la red.
3. Los principales proyectos de ampliación, modernización y obras nuevas, necesarias para satisfacer la demanda del transporte.
4. Los proyectos operativos con efectos significativos sobre la política de inversión que mejoran la productividad del transporte sobretodo en lo relativo a sus costos.

A partir de la comparación entre los diferentes escenarios de evolución de la demanda del tránsito, el esquema director permite:

1. Obtener elementos para orientar la política de inversión en carreteras y equipo rodante.
2. Señalar acciones o proyectos operativos que mejoren la eficiencia del sistema.
3. Consolidar una metodología completa para el análisis de proyectos de modernización de la vialidad interurbana existente o de construcción de nuevas carreteras.
4. Evaluar la posibilidad de atenuar el desarrollo del sistema carretero troncal como resultado de cambios significativos en la repartición modal de los viajes o del movimiento terrestre de carga que favorecieron al ferrocarril o al cabotaje.

La metodología utilizada para la creación del esquema director fue la siguiente:

1. Cuantificar la demanda nacional de transporte de personas y carga con base en la estimación de matrices origen-destino, y expresarla en términos de flujos vehiculares para cada uno de los tramos de la red.
2. Clasificar los tramos de la red carretera en términos de capacidad, volúmenes y niveles de servicio representativos de las condiciones de circulación.
3. Determinar costos unitarios de inversión congruentes con los montos observados en obras de modernización o de

construcción de nuevas carreteras.

4. Calcular costos de operación en función de las condiciones de oferta carretera y de la intensidad de los tránsitos.

Esta metodología se representa en la gráfica 1.2.

El análisis del esquema director se centró en la red básica troncal. Para realizar este análisis, se dividió al país en 104 regiones económicas. A partir de estas regiones se genera la mayor parte del flujo vehicular interurbano dentro de la nación. También se clasificó la demanda del transporte en ocho categorías. Estas son las siguientes:

1. Movimientos de personas por automóvil o por autobús.
2. Movimientos de carga:

Agrícolas

Minerales

Azúcar

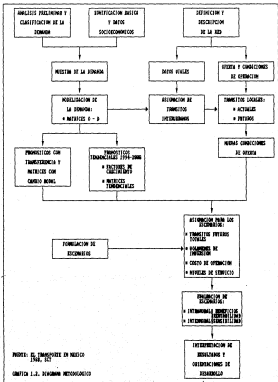
Cemento y Fertilizantes

Petróleo y derivados

Productos industriales

Maderas y productos forestales

Otra actividad que se realizó fue crear un banco de datos sobre las condiciones de oferta de la red carretera a fin de compararla con los requerimientos futuros que vendrán determinados por la demanda pronosticada.



Los pronósticos de demanda se realizaron en base a: Estudios origen-destino, un modelo gravitacional de generación-distribución de viajes y de un modelo de asignación de flujos a itinerarios basado en la población y el índice de motorización de cada zona, así como de los tiempos de recorrido entre ellas.

Los escenarios de demanda se apoyan en estudios previamente realizados, cuyas conclusiones indican:

1. La población nacional será de 100 millones de habitantes en el año 2000.
2. El producto interno bruto - PIB - crecerá a un ritmo promedio de 2% anual entre 1989 y 2000 - hipótesis tendencial baja (B).
3. El PIB crecerá a un ritmo promedio de 4% anual entre 1989 y 2000 - hipótesis tendencial alta (A).

En base a los cálculos realizados, y considerando las anteriores conclusiones, se construyeron matrices origen-destino por cada tipo de demanda entre las 104 regiones en que se dividió el país.

Se crearon escenarios alternativos de oferta que permitirán hacer frente a la demanda estimada con un nivel de servicio aceptable.

Los escenarios oferta-demanda se clasificaron según los siguientes criterios: beneficio neto actualizado, tasa interna de

retorno y los ahorros en costos de operación, en tiempos de recorrido y en volúmenes anuales de inversión. La interpretación de estos resultados permite generar orientaciones de desarrollo a nivel del Subsector Carretero en su conjunto.



## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### II.1. RED CARRETERA ANALIZADA

En la introducción de esta tesis mencionamos que su objetivo es el de evaluar la conveniencia de construir nuevos arcos en una red carretera o ampliar alguno(s) de los ya existentes comparando los costos de inversión de estos proyectos con los ahorros en los costos de operación que experimentarían los vehículos en la red, como consecuencia de la implementación de estos proyectos.

Los costos de operación que se compararán con los de inversión serán calculados mediante un modelo de programación lineal de asignación de flujos de tránsito, cuya función objetivo minimiza dichos costos.

El análisis se realizará en una red carretera del Estado de Hidalgo, en el año 1986. Tanto el año como la red se escogieron debido a la disponibilidad de datos necesarios para utilizar el modelo de programación lineal. Es importante mencionar que la misma metodología que desarrollaremos para esta red se puede implementar para cualquier red carretera dentro del país. Lo que cambiará en cada caso será nada más el volumen de los datos y las variables con las que se trabajará.

La red bajo estudio consta de 11 tramos carreteros (arcos) y unen a 11 poblaciones (nodos). Su representación, así como las características físicas y geométricas de cada tramo se muestran

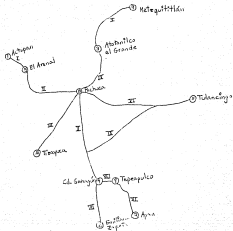


Figura 2.1. Red Carretera del Estado de Hidalgo, 1988.  
Fuente: Dirección de Planeación, SCT

| Tramo | Flujo<br>TPDA | Long.<br>(km) | Carretera<br>(m) | Acotamiento<br>(m) | Núm.<br>de<br>Carreteras | Terrano   | Autos<br>(\$) | Auto-<br>Buses<br>(\$) | Casiones<br>(\$) |
|-------|---------------|---------------|------------------|--------------------|--------------------------|-----------|---------------|------------------------|------------------|
| I     | 563           | 7             | 7.2              | 0.2                | 2                        | Lowerio   | 72.44         | 2.27                   | 25.29            |
| II    | 735           | 29            | 7.2              | 0.2                | 2                        | Lowerio   | 64.87         | 11.34                  | 23.79            |
| III   | 1040          | 39            | 8.0              | 1.5                | 2                        | Plano     | 75.29         | 6.68                   | 18.03            |
| IV    | 1185          | 34            | 7.5              | 0.0                | 2                        | Montañoso | 67.75         | 3.71                   | 28.54            |
| V     | 234           | 42            | 7.5              | 0.0                | 2                        | Montañoso | 51.28         | 2.95                   | 45.77            |
| VI    | 853           | 15            | 6.0              | 0.5                | 2                        | Lowerio   | 70.26         | 7.37                   | 22.40            |
| VII   | 960           | 16            | 7.0              | 0.0                | 2                        | Lowerio   | 74.27         | 1.83                   | 23.90            |
| VIII  | 1601          | 3             | 16.0             | 3.0                | 4                        | Plano     | 81.01         | 1.27                   | 17.72            |
| IX    | 2636          | 40            | 7.2              | 0.9                | 2                        | Plano     | 72.23         | 3.14                   | 24.63            |
| X     | 875           | 45            | 7.2              | 0.9                | 2                        | Plano     | 74.64         | 2.66                   | 22.70            |
| XI    | 755           | 47            | 7.2              | 0.9                | 2                        | Lowerio   | 70.58         | 2.94                   | 26.48            |

Fuentes: Datos Viales 1987 SCT  
 Estudios Origen-Destino 1983-1984 SCT  
 Estudios SCT: Estado de Hidalgo

Tabla 2.1. Características Físicas, Geométricas y de Flujo de Tránsito de la Red Carretera Analizada Estado de Hidalgo, 1986

| Nodo             | Población<br>(1986) | Número de auto-<br>móviles<br>(1986) | Número de auto-<br>buses<br>(1986) | Número de ca-<br>miones<br>(1986) | Motorización<br>(veh./<br>/1000 hab.)<br>(1986) |
|------------------|---------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---|
| Actopan          | 39,629              | 5,095                                | 182                                | 1,984                             | 183.22  |
| Apan             | 34,442              | 5,119                                | 134                                | 634                               | 170.93  |
| Atotonilco el G. | 27,645              | 1,294                                | 45                                 | 376                               | 62.04   |
| Cd. Sahagún      | 30,560              | 4,890                                | 127                                | 613                               | 184.22  |
| El Arenal        | 11,619              | 375                                  | 23                                 | 158                               | 47.85   |
| Emiliano Zapata  | 14,331              | 739                                  | 25                                 | 201                               | 67.34   |
| Metzquitlán      | 9,601               | 326                                  | 20                                 | 105                               | 46.87   |
| Pachuca          | 154,809             | 30,835                               | 1,718                              | 11,002                            | 281.36  |
| Tepicapulco      | 43,368              | 4,189                                | 167                                | 550                               | 112.09  |
| Tizayuca         | 18,834              | 2,636                                | 132                                | 294                               | 162.58  |
| Tulancingo       | 81,019              | 9,266                                | 443                                | 3,519                             | 163.27  |

Fuentes: Censo y Proyecciones de Población, 1980. CONAPO  
Anuario Estadístico del Estado de Hidalgo, 1987

Tabla 2.2. Poblaciones y Características de Motorización  
de los Nodos de la Red Carretera  
Estado de Hidalgo, 1986

en la figura 2.1 y la tabla 2.1 respectivamente. Las poblaciones que se encuentran unidas por la red se muestran en la figura 2.1 y algunos datos importantes para nuestro estudio se encuentran en la tabla 2.2.

## 11.2. MODELO DE PROGRAMACION LINEAL DE ASIGNACION DE FLUJOS DE TRANSITO

El modelo de programación lineal de asignación de flujos de tránsito a utilizar es el propuesto por Bóran Bergendani. Este modelo minimiza los costos totales de operación de los vehículos que circulan por la red carretera, asignando flujos de tránsito dentro de ella de manera que se satisfagan las demandas de transporte entre las distintas poblaciones a un costo mínimo.

Los costos de operación de los vehículos dentro de una red carretera se pueden dividir en: a) Costos de mantenimiento, b) Operación del vehículo, c) Tiempo consumido por el conductor, y d) Accidentes.

A medida que crece el flujo de vehículos en un tramo de la red, los costos unitarios por vehículo-kilómetro crecen como consecuencia de los congestiones que en el tramo ocurren. Esta situación se esquematiza en la figura 2.2 que se muestra a continuación.

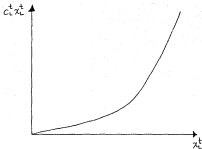


Fig. 2.2. Función Flujo - Costos Unitarios

$I_L^t$  es el número de vehículos que atraviesan el tramo  
 carretero  $L$  durante un tiempo  $t$ .  
 $C_L^t$  es el costo de operación por vehículo por kilómetro en  
 que se incurre en el tramo  $L$  durante un periodo  $t$ .

La función creciente que se representa en la figura 2.2 se  
 puede linealizar de manera que se pueda incluir en el modelo de  
 programación lineal. Esta linealización se muestra en la figura  
 2.3.

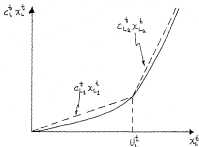


Fig. 2.3. Linealización de la Función Flujo - Costos Unitarios

- $C_{L1}^t$  es el costo de operación por vehículo en un kilómetro que existe en el trazo L antes de saturarse.
- $C_{L2}^t$  es el costo de operación por vehículo en un kilómetro que se incurre en el trazo L durante un periodo t después de que se satura el trazo.
- $X_{L1}^t$  es el número de vehículos que circulan por el trazo L en un periodo t antes de saturarse el trazo.
- $X_{L2}^t$  es el número de vehículos que circulan por el trazo L en un periodo t después de saturarse el trazo.
- $U_L^t$  es la capacidad de la carretera.

La capacidad representa el número máximo de vehículos que pueden circular por el tramo  $L$  durante un periodo  $t$  sin que en el tramo se presenten fenómenos de congestionamientos y de colas.

$X$  adquirirá valor cuando el número de vehículos en el tramo  $L$  sobrepase en un periodo  $t$  a la capacidad del tramo.

La capacidad de un tramo carretero también se puede definir en función de los niveles de servicio que existan en este tramo. De los niveles de servicio hablaremos a continuación.

Se han establecido 6 diferentes niveles de servicio para efectos de circulación continua, de acuerdo con la libertad o dificultad que tienen los vehículos para circular en una corriente vehicular, y se han denominado con letras de la A a la F, en ese orden.

#### NIVEL DE SERVICIO A.

Se le denomina también de flujo libre, ya que los conductores pueden adoptar la velocidad que deseen, en una corriente de tránsito que se caracteriza por bajos volúmenes de tráfico. La densidad de esta corriente es baja y la velocidad es regulada exclusivamente, como ya fue asentado, por el deseo de los conductores y las características geométricas del camino.



#### NIVEL DE SERVICIO B.

En este nivel se encuentran todos los flujos que tienen un comportamiento estable y la velocidad desarrollada se encuentra limitada ocasionalmente por las condiciones del tránsito. Sin embargo, los conductores pueden aún elegir la velocidad y carril de circulación deseados, ya que la reducción de velocidad no es irrazonable.

#### NIVEL DE SERVICIO C.

Aunque este nivel se encuentra aún dentro de los límites de flujo estable, los conductores no pueden seleccionar su propia velocidad, ya que está supeditada a los altos volúmenes de tránsito. Por la misma razón, los conductores encuentran cierta oposición al libre cambio de carril de circulación o para efectuar maniobras de rebase.

#### NIVEL DE SERVICIO D.

Se encuentra próximo al flujo inestable. Las velocidades desarrolladas, aunque más reducidas, son aún tolerables, ya que son por períodos cortos, de acuerdo a la variación en los volúmenes de tránsito. En este nivel, las restricciones puestas al conductor para cambiar de carril de circulación o rebasar son mayores, repercutiendo en la falta de comodidad del mismo.

#### NIVEL DE SERVICIO E.

Se caracteriza por un flujo inestable en el que las velocidades son más reducidas que en los niveles anteriores, con detenciones de corta duración. El volumen de tránsito es el correspondiente a la capacidad del camino o sur cerca de ella.

#### NIVEL DE SERVICIO F.

Este nivel de servicio corresponde a un flujo forzado con bajas velocidades de operación y paradas frecuentes. Por estas detenciones, el volumen que soporta la carretera es menor a la capacidad de la pista, llegando en grados extremos tanto el volumen como la velocidad a ser iguales a cero.

A medida que el flujo de vehículo crece, se pasa a niveles inferiores de servicio. Mencionamos con anterioridad que la capacidad se puede definir en función de los niveles de servicio, ya que un tramo cualquiera ofrecerá un servicio F cuando el número de vehículos que circulan por él sea mayor a su capacidad. En esta situación, los costos de operación crecen mucho con respecto a los costos de operación antes de saturarse el tramo.

Otras variables que intervienen en el modelo de programación lineal de Bergendahl son las cadenas de arcos, que unen dos modos

(i y j) en la red carretera.

Existen en algunas ocasiones varias maneras económicamente similares de ir de un punto i a un punto j. Cada una de estas alternativas representa una cadena de arcos. Esto (en algunas ocasiones) da como resultado que un trazo sea atravesado por varias cadenas, y el flujo en dicho trazo, antes y después de saturarse ( $X_{L1}^t, X_{L2}^t$ ) será igual a la suma de los flujos de las cadenas de las cuales este trazo forma parte. Para representar esto mediante una ecuación, se introduce una variable  $f_{ijk}^L$  tal que:

$$f_{ijk}^L = \begin{cases} 1 & \text{si el arco } L \text{ pertenece a la cadena } k \\ & \text{que une a los nodos } i \text{ y } j \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

De esta manera, la suma de flujos en un trazo L se puede definir como:

$$X_{L1}^t + X_{L2}^t = \sum_i \sum_j \sum_k f_{ijk}^L X_{ijk}^t$$

donde  $X_{L1}^t$  debe ser menor o igual que la capacidad de la carretera ( $U_L$ ), y la demanda entre los nodos i y j es satisfecha mediante los flujos de tránsito existentes en las cadenas que unen a estos dos puntos, es decir:

$$d_{ij} = \sum_k X_{ijk}$$

Después de explicitar todas las relaciones existentes entre

las variables del modelo, mostramos el modelo con su función objetivo y sus restricciones:

$$\text{FUNCION OBJETIVO: } \min Z = \sum (C_{L1}^t X_{L1}^t + C_{L2}^t X_{L2}^t)$$

SUJETA A LAS SIGUIENTES RESTRICCIONES:

$$X_{L1}^t \leq U_{L1}^t$$

$$d_{ij} = \sum_k X_{ijk}^t$$

$$X_{L1}^t + X_{L2}^t = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_{j,ijk}^t X_{ijk}^t$$

$\forall L, t$

### II.3. CALCULO DE LOS PARAMETROS DEL MODELO DE PROGRAMACION LINEAL DE ASIGNACION DE FLUJOS DE TRANSITO

Los parámetros que contiene el modelo de Bergendahl y que es preciso calcular son los siguientes:  $C_{L1}^t$ ,  $C_{L2}^t$ ,  $U_{L1}^t$  y  $d_{ij}$ . Explicaremos cómo se calcularán cada uno de ellos.

Los costos de operación ( $C_{L1}^t$ ,  $C_{L2}^t$ ), así como la capacidad ( $U_{L1}^t$ ) de un trazo carretero dependen de las características físicas y geométricas de este, así como de la composición vehicular que existe en él. En la Dirección General de Planeación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes se cuenta con una serie de tablas que relacionan las características físicas y

geométricas, tipo de terreno, composición vehicular (porcentaje de autos, buses y camiones de carga) y velocidad promedio del tramo carretero con los costos de operación en que se incurre para diversos niveles de volúmenes de tránsito. Estos niveles de tránsito determinan los niveles de servicio que se ofrecen en el tramo. La capacidad, como ya se mencionó anteriormente, será el número máximo de vehículos por unidad de tiempo que soporte este tramo antes de que en él se produzcan congestiones y colas.

En el próximo capítulo (Solución al Problema Planteado) se explicará el uso de estas tablas y la forma como, mediante ellas, se pueden calcular los costos de operación antes y después de la saturación, así como la capacidad de una carretera.

Las demandas de tránsito entre los  $n$  nodos de nuestra red se calcularán mediante un modelo gravitacional que relaciona estas demandas con el número de habitantes, la tasa de motorización y la distancia entre cada uno de ellos. Este modelo es de la forma siguiente:

$$d_{ij} = \frac{e^k (P_i P_j) (M_i M_j)}{(D_{ij})}$$

en donde:  $(P_i P_j)$  es el producto de las poblaciones del nodo  $i$  y del nodo  $j$

$(M_i M_j)$  es el producto de las tasas de motorización (Vehículos / 1000 habitantes) del nodo  $i$  y

del nodo  $j$

$D_{ij}$  es la distancia entre los nodos  $i$  y  $j$   
 $k, \alpha, \beta, \gamma$  son parámetros del modelo cuyos valores se calcularán mediante correlación múltiple, utilizando los valores de flujos de tránsito que se encuentran en la tabla 2.1. Estos flujos son tránsitos promedio diarios anuales (TPDA), es decir, es el número total de vehículos que circulan por un tramo en un año dividido entre el número de días que tiene el año.

En el próximo capítulo se realiza el ajuste de este modelo utilizando los datos de flujo de tránsito presentados en la tabla 2.1. Mediante este ajuste se obtendrán los valores  $k, \alpha, \beta$  y  $\gamma$  y se estará ya en posibilidades de calcular  $d_{ij}$  entre cualquier nodo  $i$  y cualquier nodo  $j$  de nuestra red, conociendo de antemano las poblaciones y tasas de motorización de cada uno de ellos y la distancia que los separa.

#### 11.4. EVALUACION DE LOS PROYECTOS

Conociendo todos los parámetros del modelo, podemos hacer uso de él para cuantificar el costo de operación total mínimo en que incurrirán los vehículos que circulan por la red carretera. Si

para algún tramo  $L_i$  <sup>t</sup> adquiere un valor, se determina que este tramo está saturado, es decir, el número de vehículos que circulan por él sobrepasó su capacidad. Este hecho eleva en gran medida los costos de operación de estos vehículos y por lo tanto se debe pensar en la conveniencia de invertir en algún proyecto de construcción y/o ampliación del tramo, que impida que exista saturación. Lo que hay que evaluar es si los ahorros en los costos de operación que se obtengan de estos proyectos serán mayores que la inversión que significará su puesta en marcha.

En esta tesis se evaluarán los costos de operación para la red propuesta del Estado de Hidalgo en el año de 1986. Se detectarán tramos saturados y se evaluarán proyectos alternos que generen ahorros en los costos de operación en dicha red, evitando estas saturaciones. Cada proyecto alterno cambia la configuración de la red. Estos cambios se representarán en el modelo de programación lineal. A cada proyecto le corresponde un ahorro en los costos de operación. Se escogerá aquel proyecto que genere un mayor beneficio (ahorro - costos de inversión y mantenimiento). Este beneficio será anual y se multiplicará por 15, ya que la vida útil de una carretera es de 15 años y si en ese periodo se ahorraría más de lo que costaría el proyecto, entonces se recomendará la realización de este. En caso contrario, se recomendará que el proyecto no se realice, dejando a la red con sus características iniciales.

### III. SOLUCION AL PROBLEMA PLANTEADO

#### III.1. CALCULO DE PARAMETROS DEL MODELO

Para cada tramo de la red carretera estudiada, se calcularon los siguientes parámetros necesarios para la aplicación del modelo de Bergendahl:

Costo de operación antes de saturarse ( $C^t$ )  
Costo de operación después de saturarse ( $C^{L1}$ )  
Capacidad ( $U^t$ )  
Demanda ( $d_{ij}^t$ )

El cálculo de dichos parámetros se basó en una serie de tablas proporcionadas por la Dirección General de Planeación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

La capacidad de un tramo carretero ( $U^t$ ) se calcula como sigue:

$$U^t = N (v / c) W T_L \approx 20\ 000$$

donde

- N: Número de carriles por sentido  
(v / c): Relación volumen-capacidad (Tablas 3.1 y 3.2)  
W: Factor de ajuste por ancho de carril y distancia a obstáculos laterales (Tablas 3.3 y 3.4)  
T<sub>L</sub>: Factor de composición vehicular



| Nivel de servicio | Distancia de visibilidad de rebasamiento > 500 m (%) | Valor límite para velocidad de Proyecto ponderada de 110 km/h (v / t) | Valor para una velocidad de proyecto ponderada de |         |         |         |         |
|-------------------|--|---|---|---------|---------|---------|---------|
|                   |  |   | 95 km/h   | 80 km/h | 70 km/h | 65 km/h | 55 km/h |
| A                 | 100  | 0.20  | —   | —       | —       | —       | —       |
|                   | 80   | 0.18  | —   | —       | —       | —       | —       |
|                   | 60   | 0.15  | —   | —       | —       | —       | —       |
|                   | 40   | 0.12  | —   | —       | —       | —       | —       |
|                   | 20   | 0.08  | —   | —       | —       | —       | —       |
|                   | 0  | 0.04  | —   | —       | —       | —       | —       |
| B                 | 100  | 0.45  | 0.40  | —       | —       | —       | —       |
|                   | 80   | 0.42  | 0.35  | —       | —       | —       | —       |
|                   | 60   | 0.38  | 0.30  | —       | —       | —       | —       |
|                   | 40   | 0.34  | 0.24  | —       | —       | —       | —       |
|                   | 20   | 0.30  | 0.18  | —       | —       | —       | —       |
|                   | 0  | 0.24  | 0.12  | —       | —       | —       | —       |
| C                 | 100  | 0.70  | 0.66  | 0.56    | 0.51    | —       | —       |
|                   | 80   | 0.68  | 0.61  | 0.53    | 0.46    | —       | —       |
|                   | 60   | 0.65  | 0.56  | 0.47    | 0.41    | —       | —       |
|                   | 40   | 0.62  | 0.51  | 0.38    | 0.32    | —       | —       |
|                   | 20   | 0.59  | 0.45  | 0.28    | 0.22    | —       | —       |
|                   | 0  | 0.54  | 0.38  | 0.18    | 0.12    | —       | —       |
| D                 | 100  | 0.85  | 0.83  | 0.75    | 0.67    | 0.60    | —       |
|                   | 80   | 0.84  | 0.81  | 0.72    | 0.62    | 0.55    | —       |
|                   | 60   | 0.83  | 0.79  | 0.69    | 0.57    | 0.51    | —       |
|                   | 40   | 0.82  | 0.76  | 0.66    | 0.52    | 0.45    | —       |
|                   | 20   | 0.81  | 0.71  | 0.61    | 0.44    | 0.38    | —       |
|                   | 0  | 0.80  | 0.66  | 0.51    | 0.30    | 0.19    | —       |
| E                 | NO ES APLICABLE                                      | < = 1.00  |   |         |         |         |         |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Tabla 3.1. Niveles de Servicio para Carreteras de dos Carriles bajo Condiciones de Flujo Continuo

| Nivel de Servicio | Valor Límite (v / c) para Velocidad de Proyecto ponderada de 110 km / h |            |            |
|-------------------|---|------------|------------|
|                   | 4 Carriles  | 6 Carriles | 8 Carriles |
| A                 | 0.35  | 0.40       | 0.43       |
| B                 | 0.50  | 0.56       | 0.63       |
| C                 | 0.75  | 0.80       | 0.83       |
| D                 | 0.90  | 0.90       | 0.90       |
| E                 | 1.00  | 1.00       | 1.00       |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Tabla 3.2. Niveles de Servicio para Autopistas y vías Rápidas bajo Condiciones de Flujo Continuo

| Distancia desde la orilla del carril al obstáculo (m) | Factor de Ajuste V por Ancho de Carril |      |            |      |            |      |            |      |
|---|--|------|------------|------|------------|------|------------|------|
|   | Carriles en metros                     |      |            |      |            |      |            |      |
|   | 3.65 Nivel                             |      | 3.35 Nivel |      | 3.05 Nivel |      | 2.75 Nivel |      |
|   | B                                      | E    | B          | E    | B          | E    | B          | E    |
| 1.80  | 1.00                                   | 1.00 | 0.86       | 0.68 | 0.77       | 0.81 | 0.70       | 0.76 |
| 1.20  | 0.96                                   | 0.97 | 0.63       | 0.86 | 0.74       | 0.79 | 0.68       | 0.74 |
| 0.60  | 0.91                                   | 0.93 | 0.78       | 0.81 | 0.70       | 0.75 | 0.64       | 0.70 |
| 0.00  | 0.65                                   | 0.88 | 0.73       | 0.77 | 0.66       | 0.71 | 0.60       | 0.66 |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Tabla 3.3. Efecto combinado del ancho de carril y de la distancia a obstáculos laterales sobre la capacidad y los volúmenes de servicio en carreteras de dos carriles bajo condiciones de circulación continua

| Factor de Ajuste W por Ancho de Carril y distancia a obstáculos laterales |   |      |      |      |   |      |      |      |  |
|---|---|------|------|------|---|------|------|------|--|
| Distancia desde la orilla del carril al obstáculo (m)                     | Obstáculos a un lado de un sentido de circulación |      |      |      | Obstáculos a ambos lados de un sentido de circulación |      |      |      |  |
|   | Carriles en metros                                |      |      |      | Carriles en metros                                    |      |      |      |  |
|   | 3.65  | 3.35 | 3.05 | 2.75 | 3.65  | 3.35 | 3.05 | 2.75 |  |
| Carretera dividida de 4 carriles  |   |      |      |      |   |      |      |      |  |
| 1.00  | 1.00  | 0.97 | 0.91 | 0.81 | 1.00  | 0.97 | 0.91 | 0.81 |  |
| 1.20  | 0.99  | 0.96 | 0.90 | 0.80 | 0.98  | 0.95 | 0.89 | 0.79 |  |
| 0.60  | 0.97  | 0.94 | 0.88 | 0.79 | 0.94  | 0.91 | 0.85 | 0.76 |  |
| 0.00  | 0.90  | 0.87 | 0.82 | 0.73 | 0.81  | 0.79 | 0.74 | 0.66 |  |
| Carretera dividida de 6 y 8 carriles                                      |   |      |      |      |   |      |      |      |  |
| 1.00  | 1.00  | 0.96 | 0.89 | 0.78 | 1.00  | 0.96 | 0.89 | 0.78 |  |
| 1.20  | 0.99  | 0.95 | 0.88 | 0.77 | 0.98  | 0.94 | 0.87 | 0.77 |  |
| 0.60  | 0.97  | 0.93 | 0.87 | 0.76 | 0.96  | 0.92 | 0.85 | 0.75 |  |
| 0.00  | 0.94  | 0.91 | 0.85 | 0.74 | 0.91  | 0.87 | 0.81 | 0.70 |  |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Tabla 3.4. Efecto combinado del ancho de carril y de la distancia a obstáculos laterales sobre la capacidad y los volúmenes de servicio en autopistas y vías rápidas bajo condiciones de circulación continua

| Equivalente           | Nivel de Servicio | Terreno Plano | Terreno en Lomerío | Terreno Montañoso |
|-----------------------|-------------------|---------------|--------------------|-------------------|
|                       | A                 | 3             | 4                  | 7                 |
| E para C<br>camiones  | B y C             | 2.5           | 5                  | 10                |
|                       | D y E             | 2             | 5                  | 12                |
| E para B<br>autobuses | Todos los niveles | 2             | 4                  | 6                 |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Tabla 3.5. Vehículos ligeros equivalentes por camión y por autobús en tramos largos de carreteras de dos carriles

| Equivalente       | Nivel de Servicio | Terrano Plano  | Terrano en Loerío | Terrano Montañoso |
|-------------------|-------------------|--|-------------------|-------------------|
|                   | A                 | Muy variable; para el análisis úsense las equivalencias indicadas para los niveles B a E |                   |                   |
| E para autobuses  | B hasta E         | 1.6  | 3                 | 5                 |
| E para camionetas |                   | 2  | 4                 | 8                 |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Tabla 3.6. Vehículos ligeros equivalentes por camión y por autobús en tramos largos de autopistas, vías rápidas y carreteras de carriles múltiples

Los factores  $(v / c)$  y  $T_L$  dependen del nivel de servicio (A, B, C, D, E) que presenta el tramo. Como se observa en la tabla 3.1, la relación volumen-capacidad  $(v / c)$  depende no solamente del nivel de servicio, sino también del porcentaje de visibilidad y de la velocidad de proyecto de la carretera. Esta tabla se utiliza para las carreteras de dos carriles. Para cuatro o más carriles, se emplea la tabla 3.2, que incluye los mismos parámetros. El porcentaje de visibilidad para los diferentes tipos de terrenos se consideró aquí como sigue: 90% - Plano, 70% - Lomerío, 50% - Montañoso.

La velocidad de proyecto, por otro lado, depende esencialmente del número de carriles que tiene la carretera, de su nivel de servicio y del tipo de terreno sobre el cual está construida. Las velocidades de proyecto para las diferentes características de una carretera se muestran en la tabla 3.7.

El factor de ajuste  $W$ , como se puede apreciar en las tablas 3.3 y 3.4, depende de si la carretera presenta obstáculos a uno o a ambos lados de un sentido de circulación, del ancho de carril y del ancho de acotamiento (distancia desde la orilla del carril al obstáculo).

El factor de composición vehicular,  $T_L$ , se calcula como sigue:

$$T_L = \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{E}{B} + \frac{E}{C}}$$

donde

- $f_A$  : Porcentaje de vehículos ligeros (automóviles), sobre el flujo total
- $f_B$  : Porcentaje de autobuses sobre el flujo total
- $f_C$  : Porcentaje de camiones de carga sobre el flujo total
- $E$  : Vehículos ligeros equivalentes a un autobús
- $E_B$  : Vehículos ligeros equivalentes a un camión de carga

Los vehículos ligeros equivalentes por autobús y por camión dependen del tipo de terreno sobre el que está construida la carretera (plano, lomerío o montañoso) y del nivel de servicio de la misma. Sus valores se encuentran en las tablas 3.5 (para dos carriles) y 3.6 (para carriles múltiples).

A continuación se ejemplificará el cálculo de la capacidad para cada nivel de servicio de un trazo carretero, para el trazo Actopan-El Arenal de la red estudiada; sus características de interés son, de la tabla 2.1, las siguientes:

ancho de carpeta = 7.2 m

ancho de acotamiento = 0.2 m

ancho de carril = (ancho de carpeta - ancho de acotam.) / 2  
= 3.5 m

N (carriles por sentido) = 1



|                        |                   |
|------------------------|-------------------|
| Composición Vehicular: | $\% A = 72.44 \%$ |
|                        | $\% B = 2.27 \%$  |
|                        | $\% C = 25.29 \%$ |

De la tabla 3.1, para el nivel de servicio A, con un porcentaje de visibilidad del 70 % (correspondiente a 100m), se interpola entre el 60 % y el 80 % de visibilidad, y se observa que en la columna correspondiente a la velocidad de proyecto solamente existe un valor (110 km/h). Así, se toma el valor de  $v/c$  como 0.16. Se sigue el mismo procedimiento para todos los niveles de servicio, manteniéndose fijo únicamente el porcentaje de visibilidad, ya que la velocidad de proyecto varía de acuerdo con el nivel de servicio.

Ahora, de la tabla 3.3, se obtendrá el valor de  $W$  para cada nivel de servicio. Nótese que en dicha tabla solamente existen valores para los niveles de servicio B y E. Para los niveles restantes, es necesario interpolar. Siguiendo el mismo ejemplo anterior, para un ancho de carril de 3.5 m y un ancho de acotamiento de 0.2 m, se hacen las interpolaciones y extrapolaciones necesarias y se obtiene  $W = 0.85$  para el nivel A. Se sigue el mismo procedimiento para los niveles restantes sin variar ningún parámetro.

En seguida se obtendrá el factor de composición vehicular  $T_L$ , para cuyo cálculo se requerirán los valores  $E_B$  y  $E_C$ .

(vehículos ligeros equivalentes a un autobús y a un camión de carga, respectivamente). Consultando la tabla 3.5, se encuentran los vehículos ligeros equivalentes por autobús y camión según el nivel de servicio y el tipo de terreno. Para el ejemplo analizado, y para el nivel de servicio A, se obtiene  $E_B = 4$ ,  $E_C = 4$ . Entonces, el factor de composición vehicular será:

$$\frac{T}{L} = \frac{1}{0,7244 + 4(0,0227) + 4(0,2529)}$$

Finalmente, se obtiene la capacidad máxima para cada nivel de servicio mediante la fórmula 3.1. Siguiendo con el ejemplo, para el nivel de servicio A,

$$C_A = \frac{U}{L} = 1 (0,16) (0,85) (0,547) \pm 20 000$$

$$C_A = 1 488 \quad (\text{TPDA})$$

En la tabla 3.8 se muestran las capacidades obtenidas para cada tramo de la red carretera estudiada y para cada nivel de servicio, siguiendo el procedimiento anterior.

El costo de operación de los vehículos en una carretera antes de saturarse consiste en una función lineal del tipo  $y = ax + b$ , donde:

$y$ : es el costo total por todos los vehículos ligeros equivalentes que circulan por la carretera en cada

nivel de servicio, de A a E.

a: es la pendiente de la recta  $y = ax + b$

x: es el volumen de vehículos equivalentes que circulan por la carretera

b: es la ordenada al origen de la recta

Mediante la técnica de regresión lineal se obtuvo una función de costos de operación  $y = ax + b$  para cada tramo analizado, siendo "y" la columna correspondiente a los costos totales por nivel, y "x" la columna correspondiente a las capacidades por nivel. El parámetro de interés en el modelo de Bergendahl es la pendiente "a", que es el costo de operación unitario por vehículo y por kilómetro.

Los costos de operación por tramo y por nivel se calculan a partir del tipo de terreno y la velocidad de operación. Estos datos se relacionan en la tabla 3.9, y corresponden a julio de 1969. Nótese que los costos se clasifican, además, por el tipo de vehículo. Para el análisis, el costo de operación total por tramo y por nivel se calculó haciendo una ponderación basada en la composición vehicular correspondiente. Al hacer uso de la mencionada tabla 3.9, en ocasiones fue necesario interpolar entre velocidades. Así, se obtuvieron los costos de operación por nivel para cada tramo, como se ilustra en la tabla 3.10. Fue a partir de ello que se obtuvieron las funciones de costos de operación

| Nivel de Servicio                                      | Terreno Plano |        |        | Terreno en Lowerio |        |        | Terreno Montañoso |        |        |
|--|---------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|
|  | Tipo A        | Tipo B | Tipo C | Tipo A             | Tipo B | Tipo C | Tipo A            | Tipo B | Tipo C |
| Dos carriles   |               |        |        |                    |        |        |                   |        |        |
| A  | 100           | 90     | 90     | 83                 | 67     | 67     | 70                | 50     | 50     |
| B  | 90            | 61     | 61     | 75                 | 61     | 61     | 62                | 44     | 44     |
| C  | 70            | 63     | 63     | 58                 | 47     | 47     | 48                | 34     | 34     |
| D  | 60            | 54     | 54     | 50                 | 40     | 40     | 42                | 30     | 30     |
| E  | 50            | 45     | 45     | 42                 | 34     | 34     | 35                | 25     | 25     |
| Cuatro o más carriles                                  |               |        |        |                    |        |        |                   |        |        |
| A  | 112           | 100    | 100    | 92                 | 75     | 75     | 70                | 55     | 55     |
| B  | 101           | 90     | 90     | 83                 | 68     | 68     | 63                | 50     | 50     |
| C  | 78            | 70     | 70     | 75                 | 61     | 61     | 57                | 45     | 45     |
| D  | 67            | 60     | 60     | 67                 | 55     | 55     | 61                | 40     | 40     |
| E  | 56            | 50     | 50     | 60                 | 49     | 49     | 46                | 36     | 36     |
| A: Autosóviles<br>B: Autobuses<br>C: Camiones de carga |               |        |        |                    |        |        |                   |        |        |
| Velocidades en km / h                                  |               |        |        |                    |        |        |                   |        |        |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Tabla 3.7. Velocidades de operación promedio para carreteras de 2 y 4 o más carriles

| Traso | Nivel de Servicio | v/c  | v    | DB | EC  | TL    | Capacidad (TFOP) |
|-------|-------------------|------|------|----|-----|-------|------------------|
| I     | A                 | 0.16 | 0.65 | 4  | 4   | 0.547 | 1460             |
|       | B                 | 0.33 | 0.67 | 4  | 5   | 0.461 | 2762             |
|       | C                 | 0.44 | 0.68 | 4  | 5   | 0.461 | 3725             |
|       | D                 | 0.53 | 0.69 | 4  | 5   | 0.461 | 4538             |
|       | E                 | 1.00 | 0.90 | 4  | 5   | 0.461 | 6655 = U<br>L    |
| II    | A                 | 0.16 | 0.65 | 4  | 4   | 0.467 | 1325             |
|       | B                 | 0.33 | 0.67 | 4  | 5   | 0.436 | 2504             |
|       | C                 | 0.44 | 0.68 | 4  | 5   | 0.436 | 3376             |
|       | D                 | 0.53 | 0.69 | 4  | 5   | 0.436 | 4113             |
|       | E                 | 1.00 | 0.90 | 4  | 5   | 0.436 | 7504 = U<br>L    |
| III   | A                 | 0.19 | 1.00 | 2  | 3   | 0.700 | 2660             |
|       | B                 | 0.37 | 1.00 | 2  | 2.5 | 0.750 | 5550             |
|       | C                 | 0.46 | 1.00 | 2  | 2.5 | 0.750 | 7260             |
|       | D                 | 0.57 | 1.00 | 2  | 2   | 0.800 | 9120             |
|       | E                 | 1.00 | 1.00 | 2  | 2   | 0.800 | 15877 = U<br>L   |
| IV    | A                 | 0.13 | 0.84 | 6  | 7   | 0.345 | 753              |
|       | B                 | 0.27 | 0.85 | 6  | 10  | 0.266 | 1231             |
|       | C                 | 0.43 | 0.86 | 6  | 10  | 0.266 | 1967             |
|       | D                 | 0.53 | 0.67 | 6  | 12  | 0.231 | 2130             |
|       | E                 | 1.00 | 0.68 | 6  | 12  | 0.231 | 4069 = U<br>L    |
| V     | A                 | 0.13 | 0.84 | 6  | 7   | 0.257 | 561              |
|       | B                 | 0.27 | 0.85 | 6  | 10  | 0.190 | 872              |
|       | C                 | 0.43 | 0.86 | 6  | 10  | 0.190 | 1405             |
|       | D                 | 0.53 | 0.67 | 6  | 12  | 0.162 | 1494             |
|       | E                 | 1.00 | 0.68 | 6  | 12  | 0.162 | 2847 = U<br>L    |
| VI    | A                 | 0.16 | 0.64 | 4  | 4   | 0.570 | 1167             |
|       | B                 | 0.33 | 0.66 | 4  | 5   | 0.470 | 2047             |
|       | C                 | 0.44 | 0.68 | 4  | 5   | 0.470 | 2812             |
|       | D                 | 0.53 | 0.70 | 4  | 5   | 0.470 | 3467             |
|       | E                 | 1.00 | 0.71 | 4  | 5   | 0.470 | 6998 = U<br>L    |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Tabla 3.8. Capacidades por nivel de servicio para cada traso

| Tramo | Nivel de Servicio | v/c  | W    | EB  | EC  | TL    | Capacidad (TPDR) |
|-------|-------------------|------|------|-----|-----|-------|------------------|
| VII   | A                 | 0.16 | 0.78 | 4   | 4   | 0.560 | 1390             |
|       | B                 | 0.33 | 0.79 | 4   | 5   | 0.500 | 2507             |
|       | C                 | 0.44 | 0.81 | 4   | 6   | 0.500 | 3564             |
|       | D                 | 0.53 | 0.82 | 4   | 5   | 0.500 | 4346             |
|       | E                 | 1.00 | 0.83 | 4   | 5   | 0.500 | 8255 = U<br>L    |
| VIII  | A                 | 0.35 | 1.00 | 1.6 | 2   | 0.730 | 10220            |
|       | B                 | 0.50 | 1.00 | 1.6 | 2   | 0.730 | 14600            |
|       | C                 | 0.75 | 1.00 | 1.6 | 2   | 0.730 | 21900            |
|       | D                 | 0.90 | 1.00 | 1.6 | 2   | 0.730 | 26280            |
|       | E                 | 1.00 | 1.00 | 1.6 | 2   | 0.730 | 29200 = U<br>L   |
| IX    | A                 | 0.19 | 0.91 | 2   | 2   | 0.656 | 2268             |
|       | B                 | 0.37 | 0.93 | 2   | 2.5 | 0.714 | 4914             |
|       | C                 | 0.48 | 0.94 | 2   | 2.5 | 0.714 | 6443             |
|       | D                 | 0.57 | 0.95 | 2   | 2   | 0.763 | 6480             |
|       | E                 | 1.00 | 0.96 | 2   | 2   | 0.763 | 15034 = U<br>L   |
| X     | A                 | 0.19 | 0.91 | 2   | 2   | 0.680 | 2251             |
|       | B                 | 0.37 | 0.93 | 2   | 2.5 | 0.735 | 5068             |
|       | C                 | 0.48 | 0.94 | 2   | 2.5 | 0.735 | 6633             |
|       | D                 | 0.57 | 0.95 | 2   | 2   | 0.800 | 8664             |
|       | E                 | 1.00 | 0.96 | 2   | 2   | 0.800 | 15155 = U<br>L   |
| XI    | A                 | 0.16 | 0.93 | 4   | 4   | 0.530 | 1573             |
|       | B                 | 0.33 | 0.93 | 4   | 5   | 0.470 | 2885             |
|       | C                 | 0.44 | 0.94 | 4   | 5   | 0.470 | 3888             |
|       | D                 | 0.53 | 0.95 | 4   | 5   | 0.470 | 4708             |
|       | E                 | 1.00 | 0.95 | 4   | 5   | 0.470 | 8848 = U<br>L    |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Tabla 3.8. Capacidades por nivel de servicio para cada tramo

| Velocidad<br>km/h | Tipo de<br>vehículo | Terrano<br>Plano<br>Pesos / 1.000 km / vehículo | Terrano<br>en Lowerio | Terrano<br>Montañoso |
|-------------------|---------------------|---|-----------------------|----------------------|
| 10                | A                   | 445,814   | 445,814               | 615,229              |
| 10                | B                   | 535,635   | 535,635               | 696,325              |
| 10                | C                   | 771,882   | 771,882               | 1,065,199            |
| 20                | A                   | 327,229   | 330,502               | 471,210              |
| 20                | B                   | 362,992   | 362,992               | 559,007              |
| 20                | C                   | 459,157   | 526,611               | 903,474              |
| 30                | A                   | 274,703   | 277,450               | 401,067              |
| 30                | B                   | 302,837   | 302,837               | 466,368              |
| 30                | C                   | 405,459   | 441,951               | 831,192              |
| 40                | A                   | 244,770   | 249,673               | 357,376              |
| 40                | B                   | 276,400   | 279,164               | 461,508              |
| 40                | C                   | 362,708   | 406,232               | 953,921              |
| 50                | A                   | 223,578   | 228,049               | 328,659              |
| 50                | B                   | 266,394   | 274,386               | 508,812              |
| 50                | C                   | 344,748   | 400,597               | -                    |

A: Automóviles  
B: Autobuses  
C: Camiones de carga

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Tabla 3.9. Costo de operación de vehículos sobre carretera  
pavimentada.  
Precios de julio de 1969

| Velocidad<br>km/h | Tipo de<br>vehículo | Terreno<br>Plano<br>Pesos / 1,000 km / vehículo | Terreno<br>en Lomerío<br>Pesos / 1,000 km / vehículo | Terreno<br>Montañoso<br>Pesos / 1,000 km / vehículo |
|-------------------|---------------------|---|--|---|
| 60                | A                   | 209,372   | 213,560  | 309,871   |
| 60                | B                   | 267,365   | 280,406  | -   |
| 60                | C                   | 339,907   | 407,888  | -   |
| 70                | A                   | 201,855   | 206,892  | -   |
| 70                | B                   | 273,400   | 298,006  | -   |
| 70                | C                   | 345,948   | 456,651  | -   |
| 80                | A                   | 196,858   | 198,826  | -   |
| 80                | B                   | 266,663   | 326,796  | -   |
| 80                | C                   | 359,143   | -  | -   |
| 90                | A                   | 196,127   | 197,078  | -   |
| 90                | B                   | 306,777   | 342,471  | -   |
| 90                | C                   | 379,517   | -  | -   |
| 100               | A                   | 197,144   | 197,144  | -   |
| 100               | B                   | 329,511   | -  | -   |
| 100               | C                   | 307,569   | -  | -   |
| 110               | A                   | 204,542   | 204,542  | -   |
| 110               | B                   | 208,150   | -  | -   |
| 110               | C                   | 279,600   | -  | -   |

A: Automóviles  
 B: Autobuses  
 C: Camiones de carga

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Tabla 3.9. Costo de operación de vehículos sobre carretera pavimentada  
Precios de julio de 1969



| Tra-<br>mo | Nivel<br>de<br>Ser-<br>vicio | Capa-<br>cidad<br>(TPDR) | Velocidad<br>de<br>operación<br>(km / h) |    |         | Costo por<br>tipo de<br>vehículo<br>(\$/ km / veh) |           |           | Costo<br>total<br>de<br>operación<br>(\$/km) |
|------------|------------------------------|--------------------------|--|----|---------|--|-----------|-----------|--|
|            |                              |                          | A  | B  | C       | A  | B         | C         |  |
|            |                              |                          |  |    |         |  |           |           |  |
| I          | A                            | 1 400                    | 83                                       | 67 | 198.302 | 293.626  | 442.022   | 389 992   |  |
|            | B                            | 2 762                    | 75                                       | 61 | 202.389 | 284.866  | 412.764   | 711 037   |  |
|            | C                            | 3 725                    | 58                                       | 47 | 216.458 | 275.819  | 402.268   | 985 994   |  |
|            | D                            | 4 538                    | 50                                       | 40 | 228.049 | 279.164  | 406.232   | 1 249 994 |  |
|            | E                            | 8 655                    | 42                                       | 34 | 245.348 | 299.368  | 427.663   | 2 530 439 |  |
| II         | A                            | 1 325                    | 83                                       | 67 | 198.302 | 293.626  | 442.022   | 354 147   |  |
|            | B                            | 2 504                    | 75                                       | 61 | 202.389 | 284.866  | 412.764   | 655 878   |  |
|            | C                            | 3 376                    | 58                                       | 47 | 216.458 | 275.819  | 402.268   | 940 395   |  |
|            | D                            | 4 113                    | 50                                       | 40 | 228.049 | 279.164  | 406.232   | 1 136 980 |  |
|            | E                            | 7 584                    | 42                                       | 34 | 245.348 | 299.368  | 427.663   | 2 232 622 |  |
| III        | A                            | 2 660                    | 100                                      | 90 | 197.144 | 329.511  | 379.517   | 636 970   |  |
|            | B                            | 5 550                    | 90                                       | 81 | 195.127 | 305.777  | 359.143   | 1 182 879 |  |
|            | C                            | 7 200                    | 70                                       | 63 | 201.655 | 270.383  | 342.928   | 1 670 724 |  |
|            | D                            | 9 120                    | 60                                       | 54 | 209.372 | 266.880  | 342.328   | 2 164 446 |  |
|            | E                            | 15 877                   | 50                                       | 45 | 223.578 | 271.397  | 353.728   | 3 974 844 |  |
| IV         | A                            | 753                      | 70                                       | 50 | 328.659 | 508.812  | 1 094.771 | 414 433   |  |
|            | B                            | 1 221                    | 62                                       | 44 | 313.629 | 480.478  | 1 010.261 | 629 254   |  |
|            | C                            | 1 967                    | 48                                       | 34 | 334.402 | 464.456  | 880.284   | 968 651   |  |
|            | D                            | 2 130                    | 42                                       | 30 | 351.633 | 485.368  | 831.192   | 1 044 763 |  |
|            | E                            | 4 069                    | 35                                       | 25 | 379.222 | 512.680  | 667.337   | 2 120 896 |  |
| V          | A                            | 561                      | 70                                       | 50 | 328.659 | 508.812  | 1 094.771 | 385 113   |  |
|            | B                            | 872                      | 62                                       | 44 | 313.629 | 480.478  | 1 010.261 | 557 282   |  |
|            | C                            | 1 405                    | 48                                       | 34 | 334.402 | 464.456  | 880.284   | 828 120   |  |
|            | D                            | 1 494                    | 42                                       | 30 | 351.633 | 485.368  | 831.192   | 860 054   |  |
|            | E                            | 2 847                    | 35                                       | 25 | 379.222 | 512.680  | 667.337   | 1 730 284 |  |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Tabla 3.10. Costos de operación por nivel de servicio para cada tramo  
Precios de julio de 1989

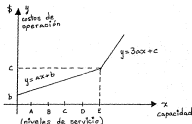
| Trá-<br>mi-<br>no | Nivel<br>de<br>Ser-<br>vicio | Capa-<br>cidad<br>(TPDA) | Velocidad<br>de<br>operación<br>(km / h) |     |         | Costo por<br>tipo de<br>vehículo<br>(\$ / km / ven) |         |           | Costo<br>total<br>de<br>operación<br>(\$/km) |
|-------------------|------------------------------|--------------------------|--|-----|---------|---|---------|-----------|--|
|                   |                              |                          | A  | B   | C       | A   | B       | C         |  |
| VI                | A                            | 1 167                    | 83                                       | 67  | 198.302 | 293.626   | 442.022 | 304 622   |  |
|                   | B                            | 2 047                    | 75                                       | 61  | 202.359 | 284.866   | 412.764 | 525 112   |  |
|                   | C                            | 2 812                    | 58                                       | 47  | 216.458 | 275.819   | 402.200 | 740 552   |  |
|                   | D                            | 3 487                    | 50                                       | 40  | 228.049 | 279.164   | 406.232 | 960 580   |  |
|                   | E                            | 6 998                    | 42                                       | 34  | 245.348 | 293.368   | 427.663 | 2 039 912 |  |
| VII               | A                            | 1 398                    | 83                                       | 67  | 198.302 | 293.626   | 442.022 | 361 602   |  |
|                   | B                            | 2 607                    | 75                                       | 61  | 202.359 | 284.866   | 412.764 | 663 498   |  |
|                   | C                            | 3 564                    | 58                                       | 47  | 216.458 | 275.819   | 402.200 | 934 659   |  |
|                   | D                            | 4 346                    | 50                                       | 40  | 228.049 | 279.164   | 406.232 | 1 181 396 |  |
|                   | E                            | 8 255                    | 42                                       | 34  | 245.348 | 293.368   | 427.663 | 2 394 478 |  |
| VIII              | A                            | 10 220                   | 112                                      | 100 | 204.542 | 329.511   | 399.891 | 2 472 655 |  |
|                   | B                            | 14 600                   | 101                                      | 90  | 197.144 | 305.777   | 379.517 | 3 386 793 |  |
|                   | C                            | 21 900                   | 78                                       | 70  | 196.858 | 273.400   | 345.940 | 4 903 671 |  |
|                   | D                            | 26 280                   | 67                                       | 60  | 201.855 | 267.365   | 339.907 | 5 996 200 |  |
|                   | E                            | 33 600                   | 56                                       | 50  | 222.306 | 266.394   | 344.748 | 8 251 524 |  |
| IX                | A                            | 2 268                    | 100                                      | 90  | 197.144 | 329.511   | 379.517 | 550 424   |  |
|                   | B                            | 4 914                    | 90                                       | 81  | 195.127 | 305.777   | 359.143 | 1 174 439 |  |
|                   | C                            | 6 443                    | 70                                       | 63  | 201.855 | 270.303   | 342.920 | 1 539 266 |  |
|                   | D                            | 8 480                    | 60                                       | 54  | 209.372 | 266.880   | 342.328 | 2 068 482 |  |
|                   | E                            | 15 034                   | 50                                       | 45  | 223.578 | 271.397   | 353.728 | 3 865 775 |  |
| X                 | A                            | 2 351                    | 100                                      | 90  | 197.144 | 329.511   | 379.517 | 567 140   |  |
|                   | B                            | 5 059                    | 90                                       | 81  | 195.127 | 305.777   | 359.143 | 1 106 253 |  |
|                   | C                            | 6 633                    | 70                                       | 63  | 201.855 | 270.303   | 342.920 | 1 550 402 |  |
|                   | D                            | 8 654                    | 60                                       | 54  | 209.372 | 266.880   | 342.328 | 2 062 370 |  |
|                   | E                            | 15 156                   | 50                                       | 45  | 223.578 | 271.397   | 353.728 | 3 844 252 |  |
| XI                | A                            | 1 573                    | 83                                       | 67  | 198.302 | 293.626   | 442.022 | 416 115   |  |
|                   | B                            | 2 885                    | 75                                       | 61  | 202.359 | 284.866   | 412.764 | 748 735   |  |
|                   | C                            | 3 898                    | 58                                       | 47  | 216.458 | 275.819   | 402.200 | 1 036 322 |  |
|                   | D                            | 4 708                    | 50                                       | 40  | 228.049 | 279.164   | 406.232 | 1 290 982 |  |
|                   | E                            | 8 848                    | 42                                       | 34  | 245.348 | 293.368   | 427.663 | 2 602 958 |  |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Tabla 3.10. Costos de operación por nivel de servicio para cada  
línea  
Precios de julio de 1989

para cada uno de los tramos, que se muestran en la tabla 3.11.

El costo de operación después de saturarse, por otra parte, se calcula simplemente multiplicando por tres la pendiente de la función de costos correspondiente a cada tramo, para obtener un conjunto de funciones de costos de operación vs. capacidades por nivel de servicio o volúmenes de tránsito, para cada tramo, de la forma siguiente:



La forma en que se encontraron los valores de costos de operación de la tabla 3.10, fue la siguiente: de acuerdo con la velocidad de operación de cada tipo de vehículo (obtenida a través de la tabla 3.7), y según el tipo de terreno, se consultó la tabla 3.9 para hallar el costo de operación correspondiente, que, como se observa, está expresado en pesos por 1 000 km por

| Tramo | Función de costos         | Costos de operación unitarios             |                      |
|-------|---------------------------|---|----------------------|
|       |                           | antes de saturarse<br>(¢ / km / vehículo) | después de saturarse |
| I     | $y = 302.26 x - 1.074105$ | 302.26                                    | 906.78               |
| II    | $y = 303.49 x - 9.074104$ | 303.49                                    | 910.47               |
| III   | $y = 257.22 x - 1.534105$ | 257.22                                    | 771.66               |
| IV    | $y = 517.30 x - 1.354104$ | 517.30                                    | 1 551.90             |
| V     | $y = 589.56 x + 2.574104$ | 589.56                                    | 1 768.68             |
| VI    | $y = 299.98 x - 7.964104$ | 299.98                                    | 899.94               |
| VII   | $y = 300.02 x - 1.034105$ | 300.02                                    | 900.06               |
| VIII  | $y = 243.90 x - 1.924105$ | 243.90                                    | 731.70               |
| IX    | $y = 2260.91x - 9.694104$ | 260.91                                    | 782.73               |
| X     | $y = 257.79 x - 1.044105$ | 257.79                                    | 773.37               |
| XI    | $y = 304.21 x - 1.124105$ | 304.21                                    | 912.63               |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Tabla 3.11. Costos de operación unitarios  
Precios de julio de 1969

vehículo, por lo que se dividió entre 1 000 para hacerlo unitario. En casi todos los casos fue necesario efectuar interpolaciones. Los datos de la columna "Costo total de operación" fueron calculados como sigue: se hizo un promedio ponderado, en base a la composición vehicular correspondiente del costo de operación en la columna anterior, para obtener un costo promedio por vehículo y por kilómetro en cada uno de los niveles de servicio. Esta cantidad se multiplicó por la capacidad correspondiente, y así se obtuvieron los costos totales de operación por nivel de servicio para cada tramo.

Como se indicó en líneas anteriores, las columnas de la tabla 3.10 correspondientes a "capacidad" y "costo total de operación" son las que se emplearon para la regresión lineal y la obtención de los parámetros  $C_{L1}^1$  y  $C_{L2}^2$  que se muestran en la tabla 3.11.

Hasta ahora, ya se calcularon las capacidades y los costos de operación unitarios antes y después de la saturación para cada uno de los tramos de la red carretera estudiada. Ahora solamente resta calcular las demandas pronosticadas entre dos nodos  $i$  y  $j$  ( $d_{ij}$ ), para lo cual se utilizó un modelo gravitacional, como se indicó en el capítulo anterior.

Para determinar los valores de los parámetros  $k$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\delta$  contenidos en el modelo fue necesario efectuar un ajuste del

mismo recurriendo a la técnica de correlación múltiple, y utilizando datos actuales reales de cenensa, población, motorización y distancias.

Primeraente, se linealizó el modelo de la siguiente forma:

$$\ln(d_{ij}) = \ln(k) + \alpha \ln(P_i P_j) + \beta \ln(M_i M_j) - \gamma \ln(D_{ij})$$

A esta ecuación se le aplicó la técnica de correlación múltiple, con datos de todos los tramos carreteros, excepto el tramo IX, para el cual no se contaba con datos de población y motorización. Se obtuvieron como resultado los siguientes valores para los parámetros, con un coeficiente de correlación de 0.79, considerado bueno:

$$k = 5.566$$

$$\alpha = 0.133$$

$$\beta = 0.328$$

$$\gamma = 0.344$$

Así pues, el modelo utilizado para pronosticar demandas de tránsito fue el siguiente:

$$d_{ij} = \frac{5.566 (P_i P_j)^{0.133} (M_i M_j)^{0.328}}{(D_{ij})^{0.344}}$$

### III.2. EVALUACION DE PROYECTOS

Con los datos de demanda de tránsito de 1966, se determinó que ya para este año algunos tramos se encontraban saturados. Se llegó a esta conclusión calculando las demandas entre nodos, tomando en cuenta las cadenas como se describen en el capítulo anterior.

Los tramos saturados fueron dos:

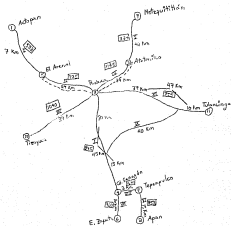
II: El Arenal - Pachuca

IV: Pachuca - Atotonilco

Ya identificados los tramos saturados, se definieron cinco posibles proyectos (ilustrados en las gráficas 3.1 a 3.4):

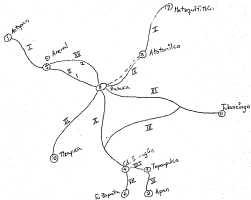
1. Dejar la red tal como está
2. Ampliación a 4 carriles de ambos tramos
3. Ampliación del tramo Pachuca - Atotonilco y construcción de un nuevo arco de dos carriles adicional paralelo al tramo El Arenal - Pachuca
4. Ampliación del tramo El Arenal - Pachuca y construcción de un nuevo arco de dos carriles adicional paralelo al tramo Pachuca - Atotonilco
5. Construcción de dos nuevos arcos de dos carriles adicionales, uno paralelo al tramo El Arenal - Pachuca y el otro paralelo al tramo Pachuca - Atotonilco

Se formularon, entonces, cinco modelos de Bergendahl con distintos parámetros y se corrieron todos y cada uno por

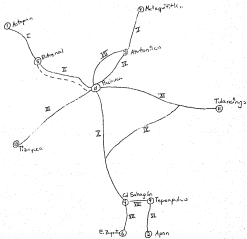


Gráfica 1.1. Proyecto 1: Red Carretera sin cambios  
 Proyecto 2: Aplicación de los arcos II y IV

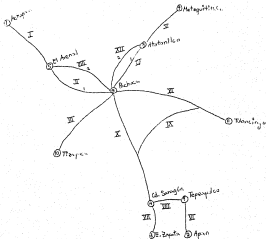




Gráfica 3.2. Proyecto 3: Construcción de un nuevo arco El Arenal - Pachuca  
Ampliación del arco IV



Gráfica 3.3. Proyecto 4: Construcción de un nuevo arco Pachuca - Atlixpa  
 Aplicación del arco II



Gráfica 3.4. Proyecto 5: Construcción de dos nuevos arcos: El Arenal - Pachuca y Pachuca - Atotonilco

computadora con el paquete "LINDO" ("Linear Interactive And Discrete Optimizer"). Los resultados de los modelos 2, 3, 4 y 5, es decir, los que implican modificaciones de ampliación y/o construcción en la red carretera estudiada, fueron comparados con el resultado del modelo 1, es decir, el de la red carretera sin modificación alguna. Los resultados para cada una de las corridas (proyectos) fueron los siguientes:

| Corrida    | Costo total de operación<br>(millones de pesos) |
|------------|---|
| Proyecto 1 | 240 837   |
| Proyecto 2 | 219 242   |
| Proyecto 3 | 218 708   |
| Proyecto 4 | 225 127   |
| Proyecto 5 | 219 843   |

Cabe aclarar que, en la función objetivo de cada corrida, los costos unitarios de operación fueron introducidos en términos de pesos por unidad al año ( $\$/u/año$ ), es decir, los términos  $C_{LI}^t$  y  $C_{L2}^t$  de la tabla 3.11 solamente fueron multiplicados por 365 para tenerlos en las unidades convenientes.

Para decidir si es conveniente o no llevar a cabo alguno de los proyectos de ampliación y/o construcción, es necesario comparar los costos totales de operación con los correspondientes a las ampliaciones y construcciones y los de mantenimiento.

La tabla 3.12 ilustra los costos unitarios de construcción de un arco de 2 carriles y de ampliación de un arco de 2 a 4 carriles:

| Acción                         | Terreno Plano | Terreno en Lowerío | Terreno Montañoso |
|--------------------------------|---------------|--------------------|-------------------|
| Construcción (dos carriles)    | 487.7         | 571.4              | 771.2             |
| Ampliación (de 2 a 4 carriles) | 377.4         | 377.4              | 377.4             |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Tabla 3.12. Costos de construcción y de ampliación de carreteras (en millones de pesos / km)  
Precios de Julio de 1989

Los costos de mantenimiento, por otro lado, dependen del ancho total de corona de la carretera. Suponiendo que un arco de dos carriles mide en total un ancho de 12 m, y uno de 4 carriles mide 22 m de ancho, se tiene:

| Número de carriles | Costo unitario de mantenimiento anual |
|--------------------|---------------------------------------|
| 2                  | \$ 14                                 |
| 4                  | \$ 26                                 |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Tabla 3.13. Costos de mantenimiento de carreteras (en millones de pesos / km)  
Precios de diciembre de 1989

En la tabla 3.14 se muestran los ahorros en costos de operación de los proyectos 2, 3, 4 y 5 con respecto al proyecto 1. Se obtuvieron restando al costo de operación total del proyecto 1 los costos respectivos de cada uno de los otros proyectos. A esa diferencia se le aplicó el índice de inflación (tabla 3.15), considerando que estos costos corresponden a julio de 1989. El resultado fue multiplicado por 15 para proyectar el ahorro total durante 15 años, si se supone una inflación del 0.3 anual.

Los costos de construcción y aplicación, por otro lado, se calcularon según la naturaleza del proyecto (construcción y/o aplicación) y tomando en cuenta el tipo de terreno y las

longitudes de los tramos en consideración. (Para la construcción de nuevos arcos, se consideró una longitud igual a la ya existente). A estos costos se les aplicó el índice de inflación correspondiente al período 1986 - 1987, de la tabla 3.15. Se hizo lo mismo para el cálculo de los costos de mantenimiento, pero a

| Proyecto | Ahorro en costos de operación (1) | Costos de construcción y ampliación (2) | Costos de mantenimiento (3) | Beneficio (1)-[(2)+(3)] |
|----------|-----------------------------------|---|-----------------------------|-------------------------|
| 1        | 0                                 | 0                                       | 0                           | 0                       |
| 2        | 58 575                            | 9 848                                   | 10 177                      | 38 550                  |
| 3        | 60 015                            | 12 178                                  | 8 015                       | 39 822                  |
| 4        | 42 615                            | 15 394                                  | 7 642                       | 19 579                  |
| 5        | 56 940                            | 17 724                                  | 5 480                       | 33 736                  |

Tabla 3.14. Evaluación de los beneficios de los proyectos propuestos (en millones de pesos). Precios de julio de 1986

| Base 1960 = 100 |         |
|-----------------|---------|
| Año             | Índice  |
| 1960            | 100.0   |
| 1961            | 129.7   |
| 1962            | 200.0   |
| 1963            | 353.9   |
| 1964            | 666.2   |
| 1965            | 666.2   |
| 1966            | 1 538.4 |
| 1967            | 3 714.2 |
| 1968            | 8 020.7 |
| 1969            | 8 507.9 |

Fuente: Nacional Financiera, S.A. (NAFINSA)

Tabla 3.15. Índice nacional de precios al productor



estos se les multiplicó por 15, que es la vida útil de una carretera.

El beneficio, finalmente, se calculó restando a los ahorros en costos de operación los costos de construcción y ampliación y los de mantenimiento, encontrándose que el proyecto que mayores beneficios aporta es el número 3 (ampliación del arco IV y construcción de uno nuevo entre Pachuca y El Arenal).

#### IV. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Al modelo de programación lineal de Bergendahl lo consideramos una herramienta bastante útil para evaluar la conveniencia de realizar proyectos de inversión en las carreteras del país. Los resultados que se obtienen de él son claros y definen adecuadamente qué alternativas de inversión realizar. El problema que surge al querer utilizarlo es el de disponer de toda la información necesaria para cuantificar los parámetros que contiene. De estos parámetros, el más difícil de cuantificar es el de los flujos de tránsito entre poblaciones (d). Nosotros utilizamos aproximaciones de flujos, basándonos en los estudios Origen-Destino y Datos Viales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Estas fuentes permiten aproximarse al valor real, pero para disponer de la información exacta habría necesidad de realizar estudios más profundos y completos que costarían bastante dinero y tiempo.

En base a esos datos de flujos de tránsito, nosotros calibramos un modelo gravitacional que nos permitió pronosticar la demanda de tránsito entre dos ciudades, dependiendo de su población, tasa de motorización y distancia entre ellas. Para nuestro modelo obtuvimos un factor de correlación de 0.79, que es bueno, pero podría haberse mejorado si hubiésemos incluido en el modelo la variable Producto Interno Bruto, que es representativo del grado de desarrollo alcanzado por cada una de las poblaciones

estudiadas. Esta variable no fue incluida por falta de información al año 1986.

La red que se analizó, para el año 1986, presentaba saturación en dos de sus tramos. Se propusieron cuatro proyectos de inversión que evitarían estas saturaciones, reduciendo de esta manera los costos de operación en ella.

De estos cuatro proyectos, el mejor fue el de ampliación en el arco IV y construcción de uno nuevo entre Pachaca y El Arenal. El ahorro en 15 años que se obtiene por la realización de este proyecto es de 60 015 millones de pesos a precios de julio de 1986, y el costo del proyecto es de 20 193 millones a precios vigentes a esa misma fecha. Es por esto que, desde un punto de vista meramente económico, es bastante recomendable el que el proyecto se realice. Hacemos la aclaración de que en esta tesis se evaluó el proyecto desde un punto de vista económico solamente. Para estos proyectos de inversión en carreteras la evaluación económica debe complementarse con consideraciones de índole política, socio-económica y cultural.

Las consideraciones de tipo político tienen que ver con los planes que en cuanto a creación de roles de desarrollo quiere implementar el gobierno.

Hoy en día, es necesario para el país la descentralización de la actividad política, económica y cultural del Distrito

Federal. Las carreteras son esenciales en el desarrollo de nuevos polos de atracción, y su construcción obedecer, en muchas ocasiones, a este interés.

En cuanto a las consideraciones que se deben tener de índole socio-económica y cultural, hay que recordar que la construcción de carreteras o ampliación de algunas ya existentes tiene como consecuencia la utilización de áreas de terrenos que antes eran utilizadas en otras actividades (p. ej., agricultura). Además, se debe recordar el deterioro que sufre el sistema ecológico de una región a consecuencia de la construcción de nuevas carreteras. Es sólo después de tener en cuenta estas consideraciones que debe decidirse el realizar o no algún proyecto de inversión en carreteras.

#### V. BIBLIOGRAFIA

1. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA, GEOGRAFIA E INFORMATICA  
"Anuario Estadístico del Estado de Hidalgo"  
1987
2. CONSEJO NACIONAL DE POBLACION  
"Censo y Pronósticos de Población del Estado de Hidalgo"  
1980
3. SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES  
"Datos Viales 1987"  
1988
4. SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES  
"El Transporte en México"  
1988
5. SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES  
"Estudios Origen-Destino 1982-1983"  
1984
6. CALDERON, HECTOR M., S.C.T.  
"La Obra Vial en México"  
1983
7. ASOCIACION MEXICANA DE CAMINOS, A.C.  
"Memorias del VIII Seminario de Ingeniería de Tránsito.

Conferencia: El Modelo de Berguenzi Aplicado a una Red de Transporte Urbano. Ing. Jorge Silva Huidenes"

1976

8. ENRIQUEZ ANDRADE, HECTOR M.

"Proceso de Planeación de los Sistemas de Transporte"

1987

9. LAZO HARGAIN, LEONARDO

"Una Fisonomía de la Ingeniería de Tránsito"

1981