

# Economía de los Transportes

## Primera Parte

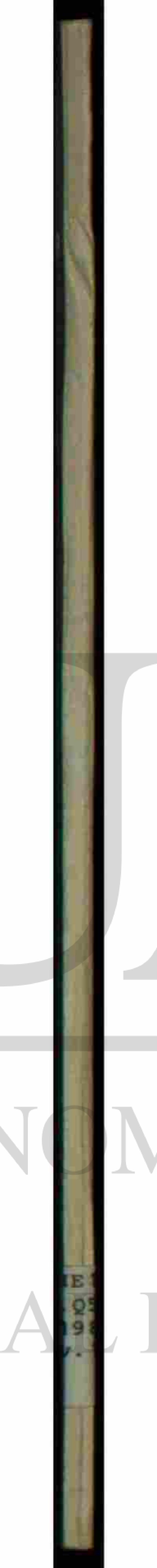
ERNESTO QUINTANILLA

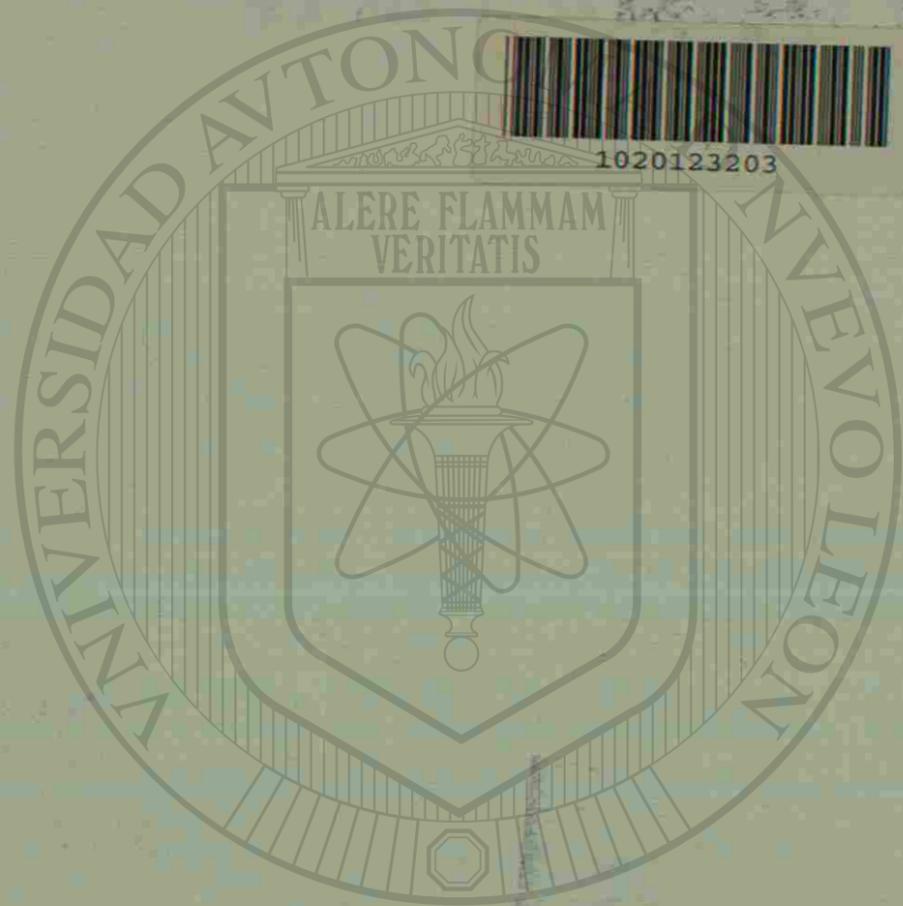


CENTRO DE INVESTIGACIONES  
ECONOMICAS

1982

51  
85  
82-89





Economía de los Transportes  
Primera Parte

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CENTRO DE INVESTIGACIONES  
ECONÓMICAS

m



# Economía de los Transportes

## Primera Parte



ERNESTO QUINTANILLA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

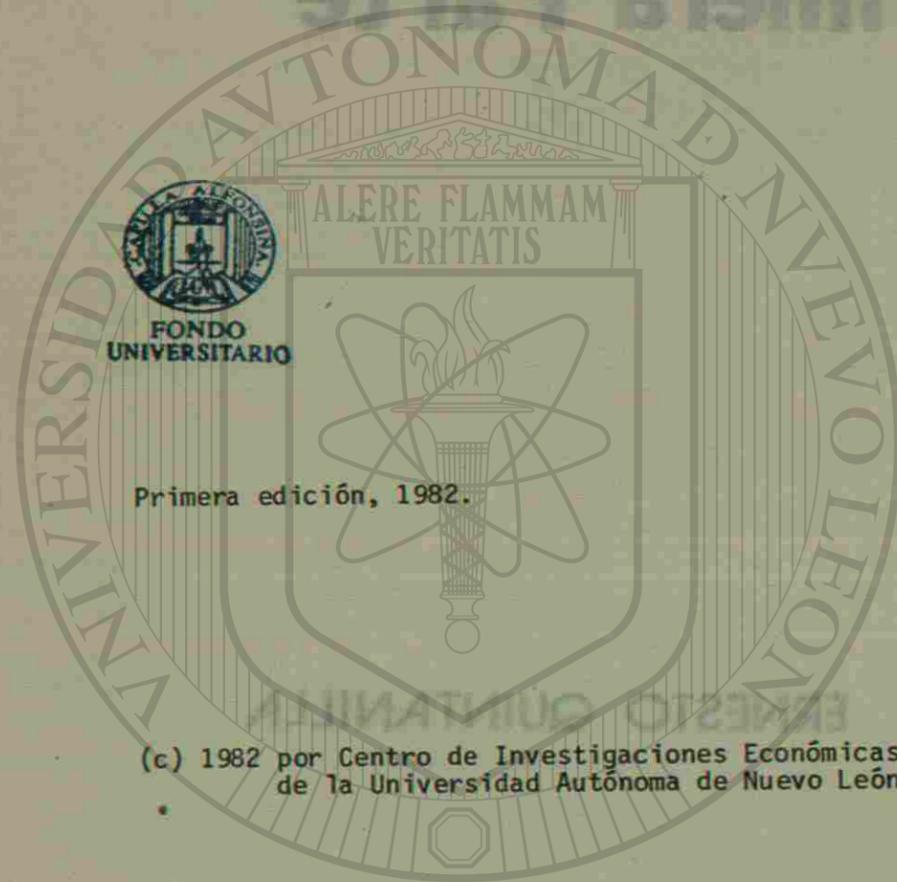
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



**FACULTAD DE ECONOMIA**  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES**  
**ECONOMICAS**

HE151  
Q55  
1982-89  
v.1

239779



(c) 1982 por Centro de Investigaciones Económicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Las opiniones, juicios o ideas que pueda contener el presente trabajo, no reflejan de ninguna forma el criterio del Centro de Investigaciones Económicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, siendo de exclusiva responsabilidad de su autor. Sin embargo, el mencionado organismo se reserva todos los derechos de la primera obra. Este libro no puede ser reproducido, ni en todo ni en parte, en ninguna forma, o mediante sistema alguno, sin permiso por escrito del Editor. Toda violación será denunciada a las autoridades competentes.

CENTRO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS

Mar. 2 - 05  
24

## PRESENTACION

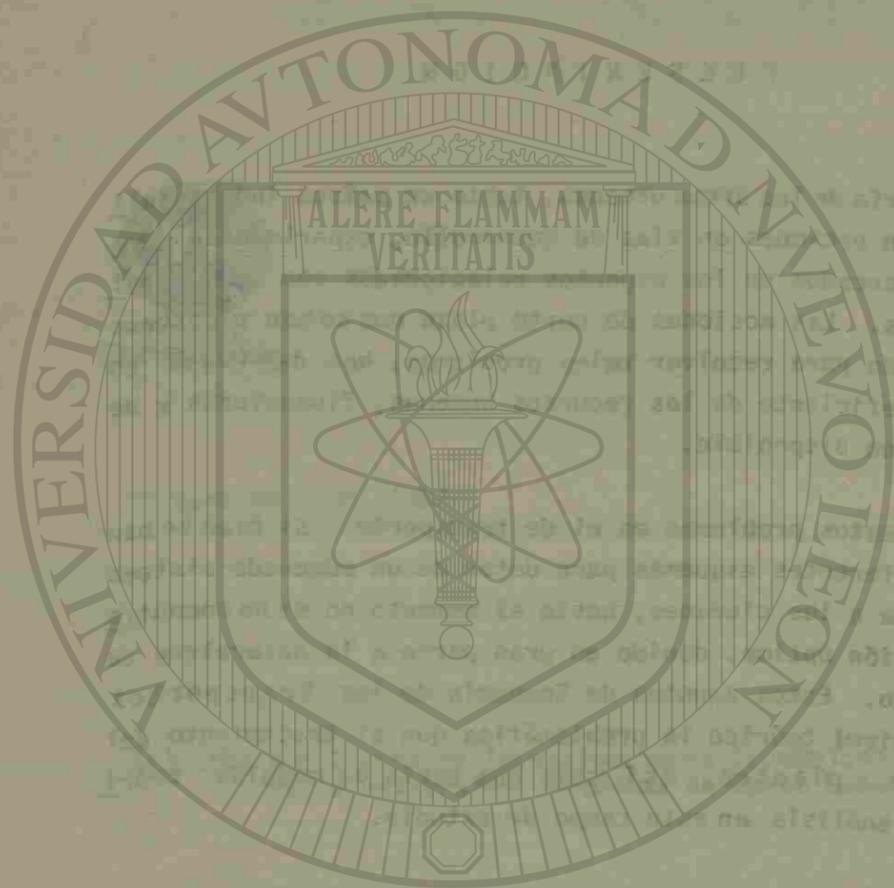
La mayoría de las áreas urbanas, tanto en países industrializados como en naciones en vías de desarrollo, experimentan problemas muy marcados en los aspectos relacionados con los servicios públicos. Las acciones de corto plazo que se han planteado e implementado para resolver tales problemas, han derivado en un empleo ineficiente de los recursos humanos, financieros y de espacio urbano disponible.

Uno de estos problemas es el de transporte. Si bien se han diseñado diferentes esquemas para dotar de un adecuado sistema de transporte a las ciudades, hasta el momento no se ha encontrado una solución óptima, debido en gran parte a la naturaleza de este servicio. Estos apuntes de Economía de los Transportes atienden a nivel teórico la problemática que el tratamiento del transporte plantea, así como una serie de modelos teóricos para el análisis en este campo de estudio.

LIC. MANUEL SILOS MARTINEZ  
DIRECTOR  
CENTRO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Diciembre de 1982

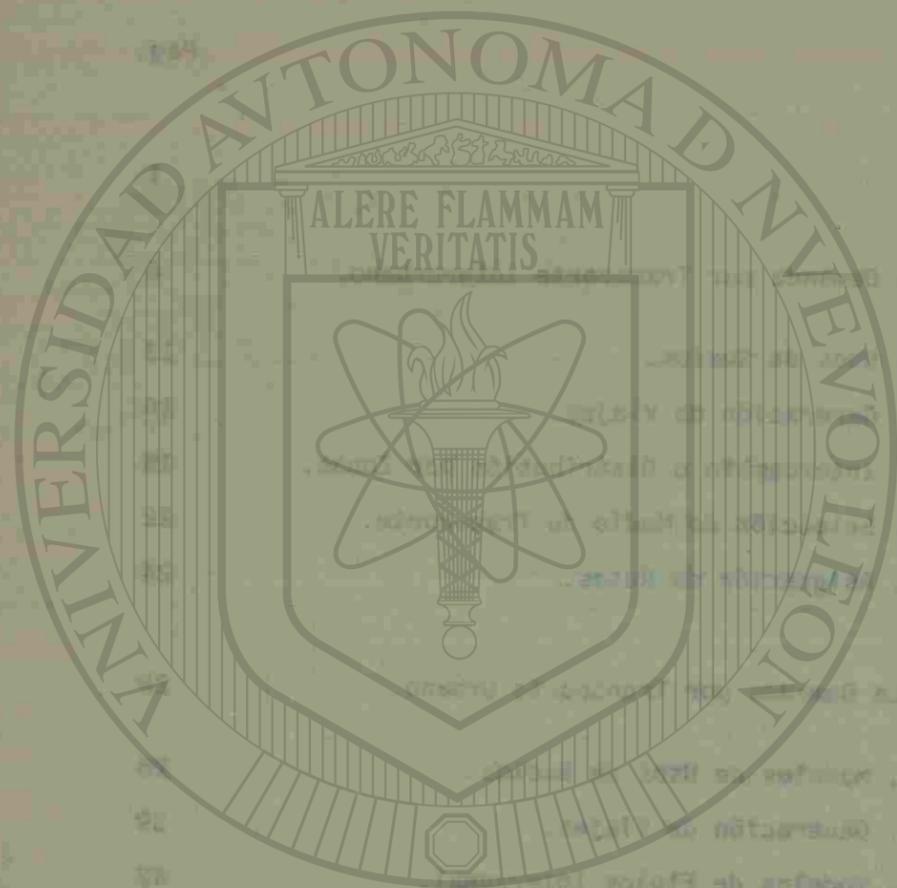


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CONTENIDO

	Pag.
Introducción.	1
CAPITULO I. La Demanda por Transporte Interurbano.	6
A. Usos de Suelos.	13
B. Generación de Viajes.	16
C. Intercambio o Distribución por Zonas.	18
D. Selección de Medio de Transporte.	22
E. Asignación de Rutas.	24
CAPITULO II. La Demanda por Transporte Urbano.	25
A. Modelos de Usos de Suelos.	26
B. Generación de Viajes.	39
C. Modelos de Flujos Interzonal.	42
D. Selección de Medio de Transporte.	49
E. Comentarios Adicionales.	51
CAPITULO III. Transporte Interurbano: Perfiles.	55
A. El Transporte Interurbano de Pasajeros.	55
B. El Transporte Interurbano de Carga.	65
BIBLIOGRAFIA GENERAL.	81



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## INTRODUCCION.

El transporte constituye uno de los sectores de la actividad económica que puede clasificarse como infraestructural o de servicio. Esto en contraposición con las actividades denominadas "directamente productivas" o sea productoras de bienes y servicios destinados al consumo final.<sup>1/</sup>

Esta actividad humana posee una serie de características que la distinguen de otros tipos de actividades. Entre los rasgos distintivos del transporte podemos mencionar el problema de las indivisibilidades, ya que la mayor parte de las instalaciones y equipo de transporte no pueden aumentar su capacidad de servicio en montos pequeños, sino que es necesario realizar expansiones del orden del 50 o del 100 por ciento.

Otra manera de categorizar el transporte es clasificándolo como una actividad productora de un conjunto de bienes públicos. Esto es válido para cualquier medio de transporte dado que, por lo general, en estas actividades se requiere (de una u otra forma) la intervención del sector público. Así, puede considerarse que la mayor parte de los servicios de transporte poseen la característica de bienes públicos, puesto que por un lado se presenta el fenómeno de la indivisibilidad y, por el otro, los operadores de los diversos medios de transporte no pagan por los servicios laterales, tales como las calles (una excepción la componen los

<sup>1/</sup> Obviamente esta distinción es artificial puesto que, por una parte, el transporte como actividad proporciona elementos de consumo final. Por otra, existe el caso de la producción de bienes de capital y de insumos, que no pueden considerarse infraestructura ni consumo final.

diversos servicios del transporte aéreo, en los que se suelen pagar derechos por el uso de las instalaciones aeroportuarias).

El problema de clasificar al transporte se complica dado que, además de poseer características de bien público, también comparten sus servicios algunas de las características de los bienes privados. Además, el transporte produce una serie de incidencias sobre el resto de las actividades humanas: La actividad del transporte produce, por una parte, el fenómeno denominado de "economías externas".<sup>2/</sup> Por otra parte, en el lado de la producción, - las actividades de transporte permiten la concentración de una serie de actividades productivas, lo que a su vez posibilita la generación de los fenómenos tecnológicos de "economías a la escala" (reducción de los costos unitarios de producción al aumentar el número de unidades producidas) y de "economías de aglomeración", que pueden definirse como la reducción en los costos unitarios de producción y/o el incremento en las ventas, resultante de la concentración de diversas actividades económicas en un área geográfica limitada. Los mayores ahorros en los costos de operación provienen de la drástica reducción en el costo de los servicios infraestructurales (agua, energéticos, comunicaciones, etc.) El desarrollo de los medios de transporte puede considerarse como uno de los más importantes factores explicativos en el desarrollo de las ciudades. El fenómeno conocido como "urbanización" es prácticamente desconocido en la historia anterior al nacimiento del sistema capitalista, en el cual los transportes experimentan un desarrollo inusitado.

2/ Definidas como el impacto sobre las actividades ya sea de producción o del consumo de una determinada entidad económica (empresa o consumidor) generado por las actividades de otra entidad.

Es posible afirmar que el transporte, en cuanto actividad, ejerce una influencia muy importante sobre las actividades de consumo y producción y, en general, sobre el bienestar de la población, en tres formas, a saber: En primer lugar, el transporte compete<sup>3/</sup> con otras actividades humanas, muy especialmente con el esparcimiento familiar, ya que se lleva (consume) tiempo que pudiera ser utilizado en otras actividades humanas. Esto resulta del hecho de que el transporte es un bien cuya demanda es derivada, es decir, que se utiliza con el propósito de llevar a cabo actividades ulteriores, de tal manera que, en muchas ocasiones (el viaje al trabajo, por ejemplo), el transporte no se considera como un bien de consumo final capaz de proporcionar una determinada satisfacción.

En segundo lugar, las actividades de transporte inciden en forma negativa a través de la contaminación ambiental. A mayor nivel de las actividades de transporte, mayor grado de contaminación, especialmente si se trata del transporte automotor.

En tercer lugar, otra incidencia negativa que produce el transporte es en la generación del problema de la congestión vehicular. Es decir, aparte de un mundo imaginario en el que pudiera existir una calle para el uso exclusivo de una persona, el transporte reduce el espacio disponible de todas las personas para realizar todas las demás actividades.

La diferencia entre la contaminación ambiental y la congestión vehicular reside en que, en tanto que los efectos de la contaminación no son padecidos en forma inmediata por la entidad que

3/ En el sentido de competir por el presupuesto y por el tiempo disponible de las entidades económicas.

la produce, en el caso de la congestión vehicular el impacto negativo recae directa e inmediatamente sobre la entidad productora (por ejemplo, en un embotellamiento de tránsito en la ciudad, cada automovilista contribuye a crear y agravar el problema pero, al mismo tiempo, cada uno padece las consecuencias).

Una característica adicional que podemos señalar con respecto al transporte reside en el hecho de que la demanda por estos servicios es, simultáneamente, un sustituto y un complemento de la demanda por espacio, sobre todo en el caso de las áreas urbanas. Esta aparente paradoja puede resolverse de la siguiente manera: en el centro del área urbana el espacio tiene un precio muy elevado, en tanto que en los lugares más alejados el precio es más bajo. Una determinada entidad (empresa o familia) puede elegir entre demandar espacio con alto precio en el centro, pero ahorrando costos de transporte, o bien demandar espacio a precio bajo en un lugar alejado del centro, pero con un fuerte gasto en servicios de transporte. Así, resulta que demandar espacio en el centro y demandar servicios de transporte son actividades sustitutivas, mientras que demandar espacio en las orillas o en las afueras del área urbana (suburbios) y demandar servicios de transporte con actividades complementarias.

De toda esta problemática surge la dificultad de utilizar el análisis económico en forma directa para el estudio del transporte.<sup>4/</sup> Una de las herramientas más utilizadas en este campo es el análisis Costo-Beneficio puesto que, según se mencionó, los servicios de transporte tienen muchas de las características de los bienes públicos.

4/ Es decir, resulta necesario realizar modificaciones al análisis económico para utilizarlo con propiedad en este campo de estudio.

El presente trabajo constituye la primera parte de un estudio más general. Se incluye en esta ocasión el análisis de la demanda por servicios de transporte, realizando un desglose (sin discutir su validez), con propósitos de exposición, entre transporte urbano y transporte interurbano.

El primer capítulo contiene el estudio de la demanda por transporte interurbano, centrándose en la exposición de un conjunto de técnicas para el análisis de la demanda, según las diferentes etapas por las que debe pasar un estudio de tal naturaleza.

En el segundo capítulo se discute la demanda por transporte urbano, utilizando el mismo procedimiento de exposición que en el capítulo anterior. Finalmente, el tercer capítulo contiene una discusión relacionada con el estudio de sistemas de transporte interurbano, tanto de pasajeros como de carga.

La limitante impuesta sobre este ejercicio es que constituye únicamente un trabajo de exposición y no de investigación, por lo que está ausente el trabajo de elaboración y confrontación de hipótesis.

5/ El término "mercados" como sinónimo de bienes y servicios que se intercambian en un mercado.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO I  
LA DEMANDA POR TRANSPORTE INTERURBANO

En este primer capítulo del trabajo se estudian los aspectos correspondientes a la demanda por servicios de transporte interurbano. Dentro de este contexto podemos considerar que la demanda por transporte deberá establecerse dentro de un determinado marco general, el cual deberá incluir, como mínimo, los siguientes aspectos:

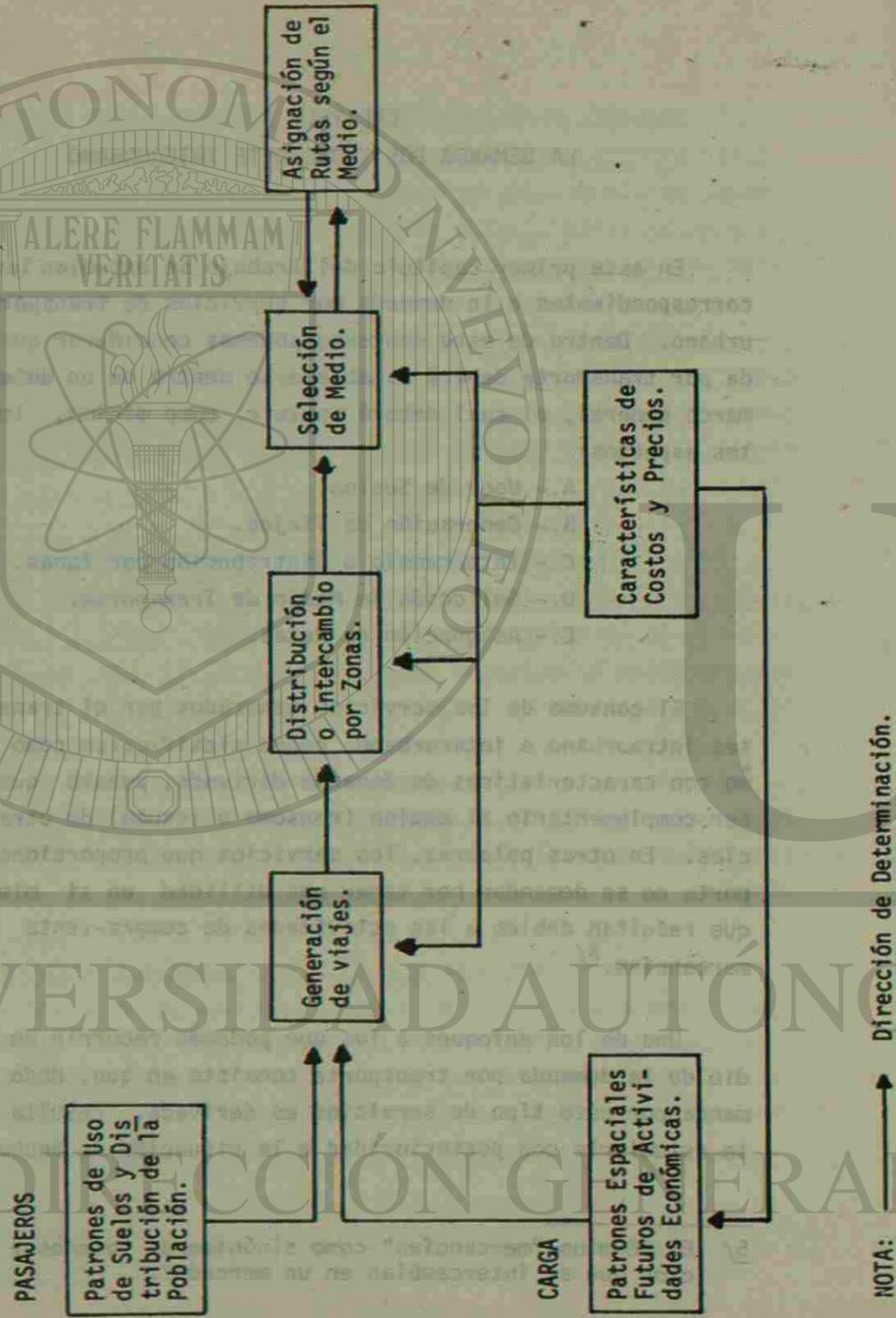
- A.- Usos de Suelos.
- B.- Generación de Viajes.
- C.- Intercambio o Distribución por Zonas.
- D.- Selección de Medio de Transporte.
- E.- Asignación de Rutas.

El consumo de los servicios generados por el transporte, ya sea intraurbano o interurbano, puede clasificarse como un consumo con características de demanda derivada, puesto que resulta ser complementario al empleo (consumo o insumo) de otras mercancías. En otras palabras, los servicios que proporciona el transporte no se demandan por tener una utilidad en sí mismos, sino que resultan debido a las actividades de compra-venta de otras mercancías.<sup>5/</sup>

Uno de los enfoques a los que podemos recurrir en el estudio de la demanda por transporte consiste en que, dado que la demanda por este tipo de servicios es derivada, resulta conveniente estudiarle con posterioridad a la situación de hecho en lo que

<sup>5/</sup> El término "mercancías" como sinónimo de "bienes y servicios que se intercambian en un mercado".

Gráfica No. 1  
 MODELO ESQUEMATICO PARA LA PROYECCION DE LA DEMANDA POR TRANSPORTE  
 DE PASAJEROS Y DE CARGA.



se refiere al resto de las actividades humanas. Bajo este enfoque que la demanda por transporte se estudia tomando en consideración un determinado nivel de las actividades humanas, es decir, dado un cierto nivel de desarrollo socioeconómico con características espaciales bien delimitadas,<sup>6/</sup> lo cual nos permita contar con la información estadística para el estudio y proyección del empleo de los servicios de transporte.

Un segundo enfoque, el cual se ha desarrollado con mayor amplitud, es el que trabaja a partir del estudio de las características del uso de la tierra o localización espacial. Luego de esta primera etapa se derivan las demandas por viajes, identificándose los orígenes y destinos de los mismos. Posteriormente se asignan los viajes a una red. Este proceso de tres fases puede detallarse con mayor precisión en la Gráfica No. 1. Es notorio que un determinante fundamental de la demanda por transporte es la selección de la localización de las actividades económicas sociales.

En la Gráfica citada podemos notar que, tanto para el caso del transporte de pasajeros como para el de carga, se parte de un estudio de los patrones de uso de suelos. sin dejar de enfatizar que los factores subyacentes a la localización residencial son diferentes a los determinantes de la localización empresarial.

De aquí se pasa a la previsión o proyección de las necesidades futuras por servicios de transporte. Se trata en este caso de realizar proyecciones de la demanda por transporte que surjan de la población y de los empresarios, de acuerdo a los patrones futuros de localización. Una vez seleccionada la ubicación, tan

<sup>6/</sup> Es decir, con una bien delineada distribución territorial de las actividades.

to para el caso del transporte de pasajeros como para el de carga, surge la generación de viajes. Se pasa entonces a la determinación de la distribución o Intercambio por Zonas; es decir, se especifican las magnitudes y las direcciones de los flujos de transporte que se considera ocurrirán entre las diferentes zonas en que se divide el área (ciudad o área metropolitana)<sup>7/</sup> bajo estudio.

De la determinación del intercambio por zonas se pasa a la selección de medio de transporte. La decisión para seleccionar el medio de transporte que se ha de demandar está determinada por las características de costos y precios de los diversos medios de transporte disponibles en el momento de la decisión. Así por ejemplo, para el caso del transporte interurbano de pasajeros, algunos seleccionarán el automóvil, otros el servicio de autobuses urbanos y otros más el ferrocarril metropolitano (metro).

La etapa final en el proceso que venimos describiendo es la asignación de rutas según los medios de transporte. Esta última selección a su vez retroalimenta a la selección de medio de transporte.

Es válido insistir en que un determinante básico de la demanda por transporte está constituido por la selección de localización, tanto residencial como institucional.

Uno de los problemas fundamentales con los que se enfrenta

<sup>7/</sup> De hecho, las consideraciones aquí expuestas son válidas para cualquier tipo y tamaño de área urbana.

la Teoría Espacial,<sup>8/</sup> es el escaso desarrollo que se ha experimentado en la Teoría de la Localización Residencial e Institucional.<sup>9/</sup> Hasta el momento no ha sido posible completar una teoría general de la localización residencial y de las empresas, debido a la existencia de una serie de insumos cuyos costos están determinados por la distancia entre la localización del vendedor y la del comprador, existiendo también el problema de la localización de los mercados a los que acuda la empresa a ofrecer sus productos.

La decisión por parte de una determinada institución para localizar su(s) edificio(s) estará dada por aquella ubicación en la que se satisfaga la condición de costo mínimo combinado de trasladar los insumos a la planta y de trasladar los productos terminados al mercado. Existe una cantidad "m" de fuentes de insumos y una cantidad "x" de mercados, de tal manera que se dificulta la selección de un punto específico para la localización de la planta, especialmente si se toma en consideración la dificultad para predecir el curso futuro en los precios y disponibilidades de los insumos en cada fuente y las condiciones de la demanda en cada uno de los mercados en los que tiene considerado participar la empresa. De lo anterior resulta fácil comprender la dificultad para proyectar la demanda por servicios de transporte que va a generar esta empresa.<sup>10/</sup> Algo análogo sucede en la Teoría de la Localización Residencial. En este caso el modelo teórico más desarrollado es el que parte del concepto de accesibilidad.

<sup>8/</sup> De la cual forma parte la Economía de los Transportes.

<sup>9/</sup> En inglés; "Plant Location".

<sup>10/</sup> De donde resulta fácil imaginar el problema que se genera al tratar de predecir el comportamiento del agregado de empresas.

Según esta tesis, la localización residencial estará determinada por el elemento de acceso de costo mínimo. Es en este nivel donde comienzan a surgir los problemas, puesto que es necesario conocer de antemano (debe haberse decidido) a qué actividad deberá tenerse el acceso de costo mínimo, si a la fuente de empleo del jefe de familia, a la fuente de abastecimiento de la unidad familiar (mercado), o bien a las fuentes de servicios sociales (tales como iglesias o parques) o a las instituciones educativas. Si se lograra conocer de antemano cuál es el factor determinante en la decisión de localización residencial sería posible predecir la demanda por transporte intraurbano de pasajeros; el problema reside en que la familia no tiene un solo factor para decidir dónde localizar su residencia; existe una serie de factores que en realidad son competitivos, entre los que destacan la fuente de empleo, la(s) institución(es) educativa(s), el medio ambiente, etc. Esto nos lleva a concluir que no existe una ley fundamental de la localización residencial.

- El problema de la proyección de la demanda por transporte se agudiza en virtud de la necesidad de contar con proyecciones de muy largo plazo, puesto que las inversiones en infraestructura, equipo y material de transporte son, por lo general, sumamente cuantiosas y, además, una vez relacionadas estas inversiones, padecen el problema de la indivisibilidad, de donde resulta una muy alta probabilidad de operaciones con pérdidas.

#### A.- USOS DE SUELOS.

Bajo el esquema que se está comentando, las proyecciones de la demanda por servicios de transporte deben partir de un conocimiento acerca de la distribución especial de las actividades económicas.<sup>11/</sup> Esto implica no únicamente la descripción de los patrones actuales, sino también la proyección de patrones futuros de usos de suelos. Esta observación es especialmente válida para el caso de los estudios de demanda por transporte de pasajeros; en estos casos se utiliza algún modelo de usos de suelos que permita proyectar la distribución espacial de la población y sus actividades.

Los modelos de usos de suelos operan bajo el supuesto fundamental de que existen relaciones empíricas estables entre los patrones de usos de suelos y la demanda por servicios de transporte. Esta condición es indispensable dado que el ingrediente fundamental para la proyección de la demanda es precisamente la proyección de los usos de suelos al futuro. De esta manera, se presentan dos factores que tienden a invalidar las proyecciones de demanda por transporte obtenidos a través de este método, a saber: El desarrollo en la tecnología del transporte interurbano (pudiendo incluir aquí el desarrollo de la tecnología de las comunicaciones, como un caso especial de "transporte" de información), así como el desarrollo social mismo, que puede conducir a alteraciones en los patrones de comportamiento a nivel social, los que a su vez conducirían a modificaciones en la relación uso

<sup>11/</sup> Las actividades llevadas a cabo por las unidades familiares también se consideran actividades económicas.

de suelos-demanda por servicios de transporte.<sup>12/</sup> Este problema resulta similar al de las proyecciones que se realizan en base a los modelos insumo-producto, donde se presenta una alta dependencia con respecto al supuesto de estabilidad en los coeficientes técnicos.

En los estudios de transporte urbano se procede a estudiar la ubicación de las áreas residenciales por una parte. Por otra, se estudia la ubicación de las áreas de trabajo para en seguida tratar de proyectar, para estos dos tipos de áreas, la red de demandas por viajes.

Además, en los estudios de demanda por transporte interurbano se enfatizan en mayor medida las relaciones insumo-producto espaciales; se trata entonces de identificar las diferentes áreas urbanas de acuerdo a su actividad exportadora más importante. Resulta evidente que los estudios de demanda por transporte interurbano se apoyan en la Teoría Base de Exportación, según la cual la región (que en este caso se identifica como el área urbana) depende, para su crecimiento económico, de una sola o una cantidad pequeña y bien definida de actividades económicas cuyo nivel a su vez, depende del comportamiento de la demanda externa por sus productos. En otras palabras, para la Teoría Base de Exportación de crecimiento regional o urbano, según sea el caso, depende de la demanda que se ejerza por los productos elaborados en la región. Siguiendo en forma consistente la tesis de base

12/ Un ejemplo está dado por la variación en la demanda por actividades recreativas, observándose una tendencia a trasladar la demanda por este tipo de servicios de lugares ubicados dentro de la ciudad hacia lugares ubicados en las afueras o "hinterland".

de exportación, para que un estudio de demanda por transporte sea más completo debe incorporar las características fundamentales del crecimiento regional; es decir, debe incluir el estudio de la migración interzonal (inter-regional) de los factores móviles de la producción-trabajo y capital.<sup>13/</sup> Asimismo, es necesario proyectar los cambios en la composición del producto regional o urbano.

En el caso de los estudios de demanda por servicios de transporte interurbano en realidad nos encontramos con un estudio análogo a un sistema de ecuaciones múltiples; o sea, es necesario estudiar al mismo tiempo el comportamiento de la base económica de todas las áreas urbanas que nos interesan (que consideramos deben estar incluidas en el sistema) para, de acuerdo al estudio elaborado para cada una de las regiones, analizar en seguida los flujos migratorios que pueden incidir sobre los patrones de crecimiento en las diferentes áreas. Finalmente, la combinación del análisis insumo-producto con los estudios de ingreso-gasto nos permitirá predecir los cambios en los niveles de producción, así como las variaciones en los flujos interurbanos.

En esta forma se complica el procedimiento general para este tipo de estudios, ya que -según se discutió- no solamente se debe incorporar la teoría de base de exportación; es preciso también incorporar una segunda teoría, que incluya una explicación acerca de la naturaleza de las relaciones económicas entre las diversas regiones (áreas urbanas, en su caso) que forman un determinado sistema. Estos requerimientos pueden cubrirse mediante el empleo del Principio de Causación Acumulativa, según

13/ Esto suponiendo que el otro factor móvil de la producción, el cambio tecnológico, se encuentra incorporado en el trabajo y en el capital.

el cual el crecimiento económico de las diferentes áreas estará determinado por la capacidad que tengan para poder atraer, de otras áreas, factores móviles en la producción<sup>14/</sup> y por la incapacidad que presenten otras áreas para retener estos factores. En esta construcción teórica, el proceso de crecimiento regional puede ser descrito de la siguiente manera: Una vez que se experimenta un impulso inicial de crecimiento en un área determinada, esto por sí mismo posibilita la atracción de recursos o factores de la producción hacia el área, lo cual constituye a su vez un segundo impulso para el crecimiento, reforzando así el impulso inicial de crecimiento, pasando el área a convertirse en un polo de desarrollo con las características que comúnmente se asocian a este fenómeno.

Se recurre al empleo de ambas hipótesis debido a la necesidad de contar con proyecciones no solamente de los patrones de crecimiento regionales, sino también con proyecciones de los flujos interregionales de factores de la producción y de mercancías. Se desea contar con proyecciones de los patrones de crecimiento, de producción y de especialización<sup>15/</sup> de las diferentes áreas que conforman el sistema, para de esta manera pasar a la derivación de la demanda por generación de viajes.

#### B.- GENERACION DE VIAJES.

Ya que se ha estimado (proyectado) la localización espacial a futuro de la población y de las actividades productivas resulta necesario convertir la información generada por esta proyec

<sup>14/</sup> Es decir, trabajo, capital y tecnología.

<sup>15/</sup> De aquí se generan los patrones de comercio o intercambio interregional.

ción en una proyección de los requerimientos por servicios de transporte, es decir, de los patrones futuros de generación y destino de viajes en el espacio económico-geográfico.<sup>16/</sup>

En el caso de la demanda por servicios de transporte que se genera por parte de las personas, la unidad básica de análisis más conveniente es la unidad familiar, de donde se desprende la importancia que tiene la Teoría de la Localización Residencial en el trabajo de proyección de la demanda por transporte urbano. De esta forma, el procedimiento para el análisis de este tipo de generación de viajes consiste en estudiar la unidad familiar y sus hábitos de trabajo, así como el respeto a sus actividades económicas y sociales, para en seguida pasar a predecir su demanda por servicios de transporte.

Para el caso del transporte de carga, lo que se requiere es contar con una proyección de la localización geográfica de la planta, conocer la estructura técnica de producción (para conocer la demanda espacial y sectorial por insumos), así como su área de mercado. Una vez contando con esta información, se hace posible la determinación de la demanda por el insumo "servicios de transporte". En términos generales, lo que se trata de realizar es, más bien que determinar con precisión y detalle las direcciones de los flujos de transporte, recurrir al procedimiento más sencillo de estimar la generación de viajes que se origina en cada uno de los puntos (áreas) del sistema y luego estimar las necesidades de transporte.

<sup>16/</sup> Definido como el lugar geográfico en que se establecen las diversas áreas del sistema y en el que se realizan todas sus actividades de producción y de intercambio.

## C.- INTERCAMBIO O DISTRIBUCION POR ZONAS.

Una vez que ha sido posible realizar proyecciones de los viajes que se originan en un área determinada, la siguiente etapa consiste en tratar de proyectar los viajes entre pares de áreas determinadas, para lo cual se requiere el empleo de modelos de intercambio por zonas.

La técnica que se ha empleado con mayor frecuencia para la estimación de los flujos de intercambio por zonas es el Modelo de Gravedad,<sup>17/</sup> construcción analítica tomada de la física y por lo tanto perteneciente a la denominada Física Social. Este modelo consiste básicamente en la aplicación de la Ley de Gravedad de Newton a las relaciones humanas espaciales.

El enunciado del Modelo de Gravedad más sencillo y general es como sigue:

$$X_{ij} = \frac{f(P_i P_j)}{d_{ij}}$$

Donde:

- X: Número de viajes generado durante un determinado lapso de tiempo entre dos "puntos" geográficos.
- i: Área geoeconómica (que puede ser una región, una ciudad o una sección de un área urbana) de origen de los viajes.
- j: Área geoeconómica de destino de los viajes.

17/ Existe una bibliografía extensa sobre este modelo. Una de las exposiciones más completas puede encontrarse en W. Isard et al: *Methods of Regional Planning*. The M. I. T. Press. Cambridge, Mass. 1960, Cap. 11, pp. 493-568.

P<sub>i</sub>: Población en el área geoeconómica de origen.

P<sub>j</sub>: Población en el área geoeconómica de destino.

d: Distancia.

Es posible especificar estadísticamente los parámetros correspondientes al modelo de gravedad por medio de estudios empíricos en los que se acumulen observaciones para estimar los parámetros por la técnica de regresión. En este modelo, así como en los modelos de gravedad en general, se puede clasificar a las variables como de Atracción (en este caso se trata de la población residente en el área geográfico-económica de destino) y de Rechazo (la población en el área de origen). La variable "distancia"<sup>18/</sup> representa el grado en que la fricción del espacio afecta los flujos de población o de mercancías. De hecho los modelos de gravedad se usan ampliamente en los estudios de migración, ya sea interregional o internacional, de población. El número de variables de atracción y de rechazo de hecho se determina casi a voluntad del investigador, pero el principio básico es el mismo.<sup>19/</sup>

Para satisfacer el objetivo de la determinación de los flujos interzonales puede también utilizarse un modelo de gravedad más completo, tal como el siguiente.

$$X_{ij} = \frac{(w_i P_i)^{\alpha} (w_j P_j)^{\beta}}{d_{ij}^{\gamma}}$$

18/ La que puede especificarse en diversas unidades de medida, tales como kilómetros en trazo lineal, kilómetros por carretera, tiempo de recorrido o costo monetario de recorrido.

19/ Véase Isard et. al, Op. Cit.

Donde:

$X_{ij}$  : Número de viajes generados durante un determinado lapso de tiempo entre el área "i" (origen) y el área "j" (destino).

$P_i, P_j$ : Población en el área de origen y en la de destino, respectivamente.

$w_i, w_j$ : Ponderaciones para la población en las áreas de origen y de destino, respectivamente.

$\alpha, \beta, \gamma$ : Parámetros.<sup>20/</sup>

$d_{ij}$  : Distancia entre el origen y el destino.

Un ejemplo puede ilustrarnos la utilidad de las ponderaciones de la población en los estudios de la demanda por servicios de transporte: Si se está tratando de determinar los parámetros correspondientes a los viajes aéreos de pasajeros en un sistema de ciudades, es evidente que el empleo de los datos de población puede conducir a distorsiones en el modelo, ya que la existencia de una población abundante en una ciudad no implica necesariamente una demanda vigorosa por servicios de transporte aéreo de pasajeros. En este caso es conveniente ponderar los datos brutos de población por medio de algún indicador que represente la capacidad económica existente en cada una de las unidades que conformen el sistema. Un indicador adecuado sería el nivel de ingresos por habitante<sup>21/</sup> para cada ciudad, puesto que la demanda por ese tipo de mercancía depende fuertemente de la capacidad de compra por parte de los demandantes.

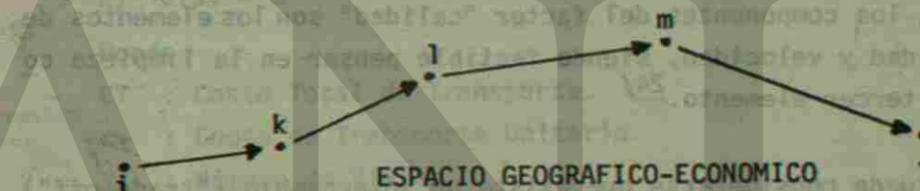
<sup>20/</sup> A ser determinados mediante el análisis de regresión múltiple sobre la información estadística recabada.

<sup>21/</sup> Para esto sería necesario suponer que la distribución del ingreso tiene las mismas características en todas las áreas sujetas a estudio. De otra manera, un indicador más adecuado sería la moda de los ingresos por habitante.

Transformado a logaritmos naturales ambos lados de la ecuación que expresa el modelo, tenemos entonces un modelo lineal de regresión múltiple:

$$\ln(X_{ij}) = \alpha \ln(w_i P_i) + \beta \ln(w_j P_j) - \gamma \ln(d_{ij})$$

Un modelo que toma en cuenta la influencia de los puntos intermedios entre "i" y "j" sobre los flujos que se realizan entre estos dos puntos es el Modelo de Oportunidades Intermedias. Esquemáticamente, este modelo intenta captar el efecto que los lugares k, l, m, etc., ejercen sobre la magnitud de los flujos entre los lugares "i" y "j", todos ellos ubicados en un mismo espacio geográfico-económico:



Una expresión simbólica del modelo de oportunidades intermedias puede ser la siguiente:<sup>22/</sup>

$$X_{ij} = \frac{P_i P_j \sum_{k=i+1}^{n=j-1} P_k}{d_{ij}}$$

En este caso estamos tomando la población que existe entre las localidades "i" y "j" como indicador representativo de las

<sup>22/</sup> Donde la simbología es la misma que se utiliza para los modelos anteriores.

"oportunidades" que se presentan a una determinada unidad<sup>23/</sup> que inicia su desplazamiento en "i" y cuyo destino final esperado es "j". Esta hipótesis tiene mayor validez cuando se aplica en estudios de movimientos de personas, ya sea permanentes (migración o bien transitorios (viaje)).

#### D.- SELECCION DEL MEDIO DE TRANSPORTE.

Los factores que influyen mayor medida para la selección de medio de transporte son, por una parte, las consideraciones de costos y precios en la generación de los servicios de transporte y, por la otra, la calidad de los servicios. Más concretamente, los componentes del factor "calidad" son los elementos de seguridad y velocidad, siendo factible pensar en la limpieza como un tercer elemento.<sup>24/</sup>

Puede considerarse que existe un intercambio ("trade-off") entre precio y calidad, presentándose en este caso una relación directa (a mayor calidad, mayor precio y viceversa). Igualmente, dentro del factor "calidad" se presenta un intercambio entre la seguridad y la velocidad, en especial en el transporte terrestre, tratándose en esta instancia de una relación inversa.

Por ejemplo, la selección del medio de transporte puede ser determinada de acuerdo al Costo Mínimo, dado un cierto nivel de calidad que se espera por parte del medio de transporte demandado. En este caso, para resolver el problema, puede recurrirse al empleo de un Modelo de Programación, donde el planteamiento

<sup>23/</sup> Trátase de un pasajero o de una mercancía.

<sup>24/</sup> Aún más un cuarto elemento integrante de este factor puede ser el trato a los pasajeros por el personal de transporte.

consistirá en minimizar el Costo de Transporte sujeto a condiciones laterales que representen los niveles deseados o esperados de seguridad y rapidez. Conviene hacer notar que este enfoque puede aplicarse tanto el caso de transporte de pasajeros como de carga, cuidando únicamente de seleccionar indicadores adecuados para medir los factores en cada caso.

De esta manera, el modelo puede tener la expresión siguiente:

$$\text{Min CT} = c_t (V)$$

Sujeto a:

$$1) E(A) = A^*$$

$$2) E(S) = \bar{S}$$

Donde:

CT : Costo Total de Transporte.

$c_t$  : Cuota de Transporte Unitaria.

V : Número de Viajes.

E(A): Esperanza de Número de Accidentes.

$A^*$  : Número Mínimo de Accidentes.

E(S): Esperanza de Velocidad.

$\bar{S}$  : Velocidad Promedio (expresada en Kms./Hora) del Medio de Transporte.

En el caso del Transporte inter-urbano, el problema se complica en razón de que, en algunas ocasiones, los diferentes medios de transporte son complementarios y, simultáneamente, competitivos, tal es el caso del ferrocarril y del transporte por carretera, que pueden complementarse en tramos de una cierta ruta. ®

## E.- ASIGNACION DE RUTAS.

Finalmente, por lo que se refiere a la asignación de rutas, esta etapa se encuentra íntimamente relacionada con la selección de medios de transporte.

La asignación de rutas consiste fundamentalmente en especificar los intercambios por zonas para cada uno de los medios de transporte disponibles, así como para aquéllos que se considera estarán disponibles dentro del período de proyección que comprenden de el estudio. Esto es especialmente válido para el caso del transporte interurbano; la tarea consiste en establecer un mapa de flujos para cada uno de los medios de transporte.

Las técnicas más utilizadas para este tipo de trabajo son las de programación, especialmente los algoritmos de ruta crítica. El problema a resolver es el de seleccionar, para cada medio de transporte, la ruta que minimice el costo en tiempo así como el costo monetario de los viajes.

## CAPITULO II

## LA DEMANDA POR TRANSPORTE URBANO

El interés principal, de acuerdo a la línea de exposición que se ha seguido, es contar con proyecciones de la demanda por transporte urbano, en especial el de pasajeros. En consideración a este enfoque, se trata de cubrir tres grandes temas, a saber: Modelos de Usos de Suelos, Generación de Viajes y Características de Noras Punta en la Generación de Viajes.

Para el estudio de la demanda por transporte urbano de pasajeros es indispensable suponer la existencia previa de una organización espacial<sup>1/</sup> en la que existen uno o más centros, fundamentalmente de trabajo. Se parte, asimismo, de un postulado fundamental, es decir; que la localización residencial está basada en la relación que guardan las unidades familiares con los lugares de trabajo. Evidentemente es posible pensar en que la localización residencial puede obedecer a otros factores, tales como la ubicación de las instalaciones escolares, la existencia de un área (vecindario) preferente por contar con áreas verdes, la localización residencial de parientes o amigos, etc. Sin embargo, por el momento consideramos que, en la unidad familiar, el factor más importante de la decisión de localización residencial es la proximidad al lugar de trabajo del jefe de familia, por lo menos en la gran mayoría de los casos.

La proyección del transporte urbano de pasajeros consta en general de dos etapas:

<sup>1/</sup> Es decir, que existe una serie de actividades económicas que se llevan a cabo dentro de un espacio geográfico delimitado y donde cada actividad tiene una ubicación espacial definida.

## E.- ASIGNACION DE RUTAS.

Finalmente, por lo que se refiere a la asignación de rutas, esta etapa se encuentra íntimamente relacionada con la selección de medios de transporte.

La asignación de rutas consiste fundamentalmente en especificar los intercambios por zonas para cada uno de los medios de transporte disponibles, así como para aquéllos que se considera estarán disponibles dentro del período de proyección que comprenden de el estudio. Esto es especialmente válido para el caso del transporte interurbano; la tarea consiste en establecer un mapa de flujos para cada uno de los medios de transporte.

Las técnicas más utilizadas para este tipo de trabajo son las de programación, especialmente los algoritmos de ruta crítica. El problema a resolver es el de seleccionar, para cada medio de transporte, la ruta que minimice el costo en tiempo así como el costo monetario de los viajes.

## CAPITULO II

## LA DEMANDA POR TRANSPORTE URBANO

El interés principal, de acuerdo a la línea de exposición que se ha seguido, es contar con proyecciones de la demanda por transporte urbano, en especial el de pasajeros. En consideración a este enfoque, se trata de cubrir tres grandes temas, a saber: Modelos de Usos de Suelos, Generación de Viajes y Características de Noras Punta en la Generación de Viajes.

Para el estudio de la demanda por transporte urbano de pasajeros es indispensable suponer la existencia previa de una organización espacial<sup>1/</sup> en la que existen uno o más centros, fundamentalmente de trabajo. Se parte, asimismo, de un postulado fundamental, es decir; que la localización residencial está basada en la relación que guardan las unidades familiares con los lugares de trabajo. Evidentemente es posible pensar en que la localización residencial puede obedecer a otros factores, tales como la ubicación de las instalaciones escolares, la existencia de un área (vecindario) preferente por contar con áreas verdes, la localización residencial de parientes o amigos, etc. Sin embargo, por el momento consideramos que, en la unidad familiar, el factor más importante de la decisión de localización residencial es la proximidad al lugar de trabajo del jefe de familia, por lo menos en la gran mayoría de los casos.

La proyección del transporte urbano de pasajeros consta en general de dos etapas:

<sup>1/</sup> Es decir, que existe una serie de actividades económicas que se llevan a cabo dentro de un espacio geográfico delimitado y donde cada actividad tiene una ubicación espacial definida.

- 1.- La realización de una proyección de uso de suelos.
- 2.- La base de la proyección de uso de suelos, proyectar el número de viajes, los orígenes y destinos y la selección de medios de transporte y rutas.

Fundamentalmente se trata de proyectar, en primer lugar, la distribución de las diversas actividades humanas<sup>2/</sup> en los diferentes sectores en que operativamente pueda dividirse el área urbana en estudio. Una vez que haya sido posible establecer el más probable uso futuro del espacio urbano, se hace posible predecir el número y la dirección de los viajes que habrán de generarse dado el patrón de uso de suelo urbano, siendo el ejemplo más evidente el de los viajes de los lugares de residencia a los lugares de trabajo y viceversa. Por otro lado, la selección de medios de transporte se puede proyectar en base a esta información, complementada con estadísticas relativas a niveles de ingresos y gastos y preferencias por determinado medio de transporte, así como empleo efectivo actual de los diversos medios.

#### A.- MODELOS DE USOS DE SUELOS.

En esta primera etapa de la proyección de la demanda por transporte urbano de pasajeros generalmente la orientación es hacia el empleo de un enfoque de costo mínimo. La forma como se puede representar el efecto de la "accesibilidad", o costo de transporte desde cualquier punto de la superficie estudiada hasta el centro de la misma, mediante la utilización de rutas de costo mínimo.<sup>3/</sup> De esta manera se logra definir la "superfi-

<sup>2/</sup> Que pueden categorizarse como: de producción de bienes y servicios (mercancías), de residencia y sociales.

<sup>3/</sup> Expresado ya sea en tiempo o en dinero, o en una combinación de ambos componentes.

cie de oportunidad", es decir, el plano compuesto por las relaciones de costo mínimo entre las ubicaciones residenciales potenciales y las ubicaciones de los lugares de trabajo.

Los lugares de trabajo se encuentran concentrados, para propósitos del estudio, en un solo núcleo o bien un número pequeño de núcleos, dado que el objetivo es proyectar el grueso de la demanda por servicios de transporte (es decir, no toda la demanda, lo cual sería en realidad impracticable, mucho menos se trata de proyectar la demanda generada por cada uno de los trabajadores o de las unidades familiares). A este respecto existe una serie de modelos que se fundamentan en la hipótesis de gravedad y que son los que históricamente se utilizaron primero en este tipo de estudios. El modelo más sencillo es el de Hansen,<sup>4/</sup> cuya característica principal consiste en el crecimiento residencial (c) se hace depender de la accesibilidad (A) a los centros de empleo de mano de obra, dependiendo también de la oferta de tierra disponible (s) para construcciones residenciales, es decir:

$$c = f(A, s)$$

Para especificar y ajustar una función de esta naturaleza es necesario contar con información relativa a una serie de tiempo (análisis diacrónico) compuesta por observaciones obtenidas de cada una de las subdivisiones del área urbana bajo estudio.

Pongamos por caso un área urbana en la que exista, por un lado, una determinada sectorización de las actividades (es decir,

<sup>4/</sup> Hansen, W. G.: "Land Use Forecasting for Transportation Planning" en Traffic Origin and Destination Studies: Appraisal of Methods. Highway Research Bulletin 253. Highway Research Board, Washington 1960.

que actividades del mismo tipo tiendan a concentrarse en áreas más o menos bien delineadas) y, por otro lado, para la que exista información estadística. Supongamos que el área en cuestión puede subdividirse en doce sectores y que el período para el que es posible encontrar información sea 1975-1981. Para cada uno de los sectores se cuantifica el crecimiento residencial.<sup>5/</sup>

En este caso particular tendremos:

c: Aumento 1975-1981 en el número de casas-habitación.

A: Costo mínimo en tiempo y monetario de desplazarse del centro gravitacional del sector hasta el centro gravitacional del sector en que se concentran las fuentes de empleo (que bien puede ser el centro comercial de la ciudad).

Donde por "centro gravitacional" se entiende el lugar en el espacio urbano en el que se concentra la mayor parte de los usuarios de la tierra, ya sean residencia o centros de trabajo.

s: Oferta de tierra disponible, es decir, el número de lotes disponibles en el sector para construcción de casas-habitación.

En caso de haberse detectado dos centros gravitacionales de fuentes de empleo es posible recurrir a la utilización de una media ponderada de los costos de acceso a ambos centros, siendo los factores de ponderación las proporciones de trabajadores que se dirigen desde los lugares de residencia hacia cada uno de los centros de trabajo, es decir:

$$A = \frac{w_1 A_1 + w_2 A_2}{A_1 + A_2}$$

<sup>5/</sup> Representado por el aumento en el número de casas-habitación.

Donde:

$w_1, w_2$  = Proporción del total de trabajadores que se dirigen a cada uno de los centros 1 y 2.

$A_1, A_2$  = Costo de acceso a los centros 1 y 2 a partir de un determinado sector.

Es claro que pueden existir tres o más centros y que es posible también construir una media ponderada en este caso.

Una especificación de este modelo puede ser la siguiente:

$$c = \alpha + \beta A + \gamma s + u, \quad 6/$$

que puede ajustarse mediante el empleo del método de mínimos cuadrados. De esta manera es posible contar con un modelo de uso de suelos para el período 1975-1981, que puede utilizarse (dependiendo de la bondad del ajuste) para proyectar el uso de suelos (la variable dependiente "c") para períodos posteriores a 1981.

Otro modelo de uso de suelos que se puede utilizar es el que se desarrolló para el estudio del Area de Boston.<sup>7/</sup> Este es un modelo de gravedad que se utiliza para representar la accesibilidad desde un determinado sector hacia otro.

La especificación del modelo del Area de Boston es como sigue:

$$A_{jk} = \sum_{i=1}^n z_{ik} e^{-\beta T_{ij}}$$

<sup>6/</sup> Donde "u" representa el término de error y donde, en condiciones que satisfagan los requerimientos para el empleo del método de mínimos cuadrados,  $E(u)=0$

<sup>7/</sup> Ver: D. Brand et al: "Technique for Relating Transportation Improvements and Urban Development Patterns". en *Urban Land Use. Concepts and Methods*. Highway Research Record 207. Highway Research Board. Washington, D.C. 1967.

Donde:

$A_{jk}$  = Accesibilidad de la Actividad "k" a la zona o sector "j".

$Z_{ik}$  = Nivel de la actividad "k" en la zona o sector "i".<sup>8/</sup>

$T_{ij}$  = Tiempo de viaje de la zona o sector "i" a la zona o sector "j".

$\beta$  = Parámetro que mide la propensión de la zona "i" y la zona "j" a interactuar en la actividad "k".

i, j = Zonas o sectores del área urbana.

k = Actividades.

En este modelo, es conveniente hacerlo notar, no se especifica la existencia de un centro único en el área urbana. Además, no existe una restricción a priori para que la actividad "k" se encuentre localizada en un sector determinado; en otras palabras las actividades no están necesariamente restringidas a una localización única.

Entonces, en este modelo la variable de accesibilidad ( $A_{jk}$ ) se hace depender tanto del tiempo de viaje entre las zonas "i" y la zona "j", como de los niveles de las actividades económicas y de las interacciones entre zonas.

El parámetro  $\beta$  habrá de obtenerse a través de un estudio empírico capaz de, primeramente, generar una matriz de interacciones entre, por un lado, zonas o sectores del área urbana y, por el otro, actividades.

De esta matriz de interacciones entre actividades y zonas<sup>9/</sup>

<sup>8/</sup> Puede representarse por medio de indicadores cuantitativos como número de personas empleadas, niveles de ventas, etc.  
<sup>9/</sup> Donde las sumatorias verticales o de columnas resultan ser los niveles de accesibilidad:  $\sum Z_{ik} = A_k$

MATRIZ DE INTERACCIONES

Actividad Zona	1	2	3	...	k	...	m
1	$Z_{11}$	$Z_{22}$	$Z_{12}$	...	$Z_{1k}$		$Z_{1m}$
2	$Z_{21}$	$Z_{22}$	$Z_{23}$	...	$Z_{2k}$		$Z_{2m}$
3	$Z_{31}$	$Z_{32}$	$Z_{33}$	...	$Z_{3k}$		$Z_{3m}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮
i	$Z_{i1}$	$Z_{i2}$	$Z_{i3}$	...	$Z_{ik}$		$Z_{im}$
j	$Z_{j1}$	$Z_{j2}$	$Z_{j3}$	...	$Z_{jk}$		$Z_{jm}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮
n	$Z_{n1}$	$Z_{n2}$	$Z_{n3}$		$Z_{nk}$		$Z_{nm}$
$\sum_{i=1}^n Z_{ik} = A_k$	$\sum_{i=1}^n Z_{i1} = A_1$	$\sum_{i=1}^n Z_{i2} = A_2$	$\sum_{i=1}^n Z_{i3} = A_3$		$\sum_{i=1}^n Z_{ik} = A_k$		$\sum_{i=1}^n Z_{im} = A_m$

es posible encontrar el valor del parámetro  $\beta$ , por medio de un ajuste de regresión lineal, ya que, extrayendo logaritmos naturales a la ecuación anterior tendremos:

$$\ln(A_{kj}) = -\beta T_{ij} \sum_{i=1}^n Z_{ik}$$

Una vez que se haya obtenido el parámetro  $\beta$  será posible proyectar los niveles futuros de accesibilidad ( $A_{kj}$ ) en base a estimaciones de los tiempos de recorrido entre las diferentes zonas ( $T_{ij}$ ), así como en base a proyecciones de los diferentes niveles de actividad en las áreas respectivas (es decir, los  $Z_{ij}$ ).

Una comparación entre el modelo de Hansen y el del Area de Boston nos indica que, mientras que el primero es de configuración radial (es decir, que los viajes se originan de toda el área urbana hacia un solo centro o un número pequeño de ellos), el segundo no está limitado por ese supuesto, dado que se toman en cuenta los viajes que se realizan en todas las direcciones. A priori, entonces, podemos concluir que el modelo del Area de Boston es analíticamente superior, puesto que rebasa la restricción fundamental del modelo de Hansen.

Sin embargo, ambos modelos comparten la limitación de no poder tomar en cuenta la retroalimentación que existe de hecho entre el transporte y los usos de suelos. En otras palabras, para conceder cierto grado aceptable de precisión a este tipo de modelos es necesario recurrir al supuesto de que existe estabilidad en las tendencias de crecimiento urbano.<sup>10/</sup>

Un modelo que trata de incorporar en forma explícita el fenómeno de la retroalimentación de los servicios de transporte sobre el uso de los suelos es el de Herbert y Stevens.<sup>11/</sup> Esta construcción se fundamenta en la premisa de que existe un intercambio ("trade-off") entre el costo de los servicios de transporte y el valor de la tierra, es decir, que mientras mayor porción de su presupuesto desee asignar la unidad familiar a los servicios de transporte, menor será el valor de la tierra que le será posible obtener, puesto que el valor de la tierra decrece conforme la ubicación de los terrenos esté más alejada del centro.

<sup>10/</sup> Por ejemplo, si existe una tendencia general hacia la polarización, se supone que no será compensada por una tendencia contraria hacia la descentralización.

<sup>11/</sup> Véase: J.D. Herbert & B.H. Stevens: "A Model for the Distribution of Residential Activity in Urban Areas." *Journal of Regional Science*. Vol. 2 (Fall 1960).

En el modelo de Herbert y Stevens asigna una distribución de la tierra residencial disponible en una configuración óptima; se trata en lo fundamental de un modelo de optimización, utilizando estos autores la técnica de programación lineal. La operación del modelo procede en la forma que a continuación se describe.

El período total de estudio se divide en un cierto número de subperíodos interactivos (un período de cinco años se divide en subperíodos anuales, por ejemplo), permitiendo de esta manera introducir el efecto de la retroalimentación del transporte hacia el uso del suelo. Dentro de cada uno de los períodos interactivos se manejan en forma separada diferentes tipos de actividades usuarias de los servicios de transporte, donde una actividad determinada se distribuye en una configuración óptima una vez que se ha localizado cada una de las demás actividades. Resulta evidente que en esta primera etapa en la elaboración del modelo se ignoran las interacciones que se espera ocurran entre diferentes actividades que se localizan en forma simultánea. Este problema no representa una dificultad seria en virtud de que los períodos iterativos son cortos (de un año, por ejemplo) de manera que no exista interacción entre las diferentes actividades.

En otros términos, lo que postula este modelo es un problema de localización óptima condicionada. El modelo posee dos elementos importantes, que se determinan en forma exógena, es decir: el número de unidades familiares que se van a ubicar, así como la cantidad de tierra urbana disponible. Por otra parte, se emplea un modelo de programación lineal para producir, al final del período, una configuración óptima de la localización de las unidades familiares y de la asignación del suelo habitacional.

Por lo que se refiere al planteo conceptual, se postula los factores que afectan a la decisión de localización de la familia son los siguientes (no necesariamente en orden de importancia):

- a) El presupuesto total.
- b) La canasta de consumo.<sup>12/</sup>
- c) El costo de la canasta de consumo.

El problema de optimización, conceptualmente, consiste en seleccionar la canasta de consumo que maximice el ahorro de la familia, donde el ahorro se genera a partir de las ventajas que ofrezca el área en la cual se localiza la familia. En esta canasta deberán quedar incluidos tanto el gasto en transporte como el gasto en terreno residencial (compuesto por los elementos de tamaño y de costo unitario -por metro cuadrado, por ejemplo).

La especificación del problema de optimización es como se describe a continuación.

**Notación:**

$u$  = Áreas o zonas que forman la subdivisión exhaustiva del área urbana, donde:

$$k = 1, 2, 3, \dots, u$$

$n$  = Grupos de unidades familiares, donde se postula que existen "n" grupos de unidades familiares, o bien, grupos de actividad del jefe de familia, y donde:

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$m$  = Paquetes residenciales; existen "m" de estos paquetes, donde:

$$h = 1, 2, 3, \dots, m$$

<sup>12/</sup> Es decir, el conjunto de ítems que componen la estructura regular de gasto de la familia.

y donde un paquete residencial se define como una combinación única de una vivienda, un determinado nivel de amenidad proveniente de la localización, un conjunto de viajes y un terreno de determinado tamaño.

$b_{ih}$ : Es el presupuesto residencial asignado por una unidad familiar del grupo "i" a la compra del paquete residencial "h".

$C_{ih}^k$ : Simboliza el costo anual para una unidad familiar - del grupo "i" de adquirir el paquete residencial "h" en la zona "k", excluyendo el costo del terreno.

$S_{ih}$  = El terreno (superficie) en metros cuadrados que se emplea por una unidad familiar del grupo "i" en el caso de emplear el paquete residencial "h".

• Es conveniente anotar que los grupos familiares deben presentar cierto grado de regularidad con respecto a sus preferencias entre servicios de transporte y tierra residencial; en otras palabras, los miembros de cada grupo deben tener preferencias análogas para que los grupos formados puedan funcionar como tales.

$L^k$ : Simboliza el total de metros cuadrados de tierra disponible para uso residencial en el área o sector "k", en una interacción particular del modelo.

$N_i$ : Representa el número de unidades familiares del grupo "i" que van a localizarse en el área urbana, en una interacción particular del modelo.

$X_{ih}^k$ : Es el número de unidades familiares pertenecientes al grupo "i" que emplean el paquete residencial "h"

ubicado por el modelo en el área o zona "k".

De esta manera, el problema de maximización<sup>13/</sup> puede plantearse así:

$$1) \text{ Max } Z = \sum_{k=1}^u \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^m x_{ih}^k (b_{ih} - c_{ih}^k)$$

Es decir, se maximiza el ahorro que resulta de la asignación óptima de las unidades familiares en el espacio urbano.

Las condiciones laterales quedan especificadas como sigue:

Sujeto a:

$$2) \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^m x_{ih}^k \leq L^k$$

$$3) \sum_{k=1}^u \sum_{n=1}^m x_{ih}^k = N_i$$

En tanto que la desigualdad (2) impide que la demanda por terrenos residenciales sea superior a la oferta, la igualdad (3) nos exige que todas las unidades familiares sean asignadas a una localización espacial.

El Problema Dual de Localización.- La notación para la especificación del problema dual es igual a la correspondiente al problema primo, excepto por lo siguiente:

$x_{ih}^k$  es reemplazada por:

<sup>13/</sup> Donde el maximando, en términos económicos es el ahorro.

$r^k$  : La renta anual por unidad de terreno residencial en la zona "k", donde

$v^i$  : Simboliza el subsidio anual por unidad familiar para todas las unidades familiares pertenecientes al grupo "i" donde:

$$i = 1, 2, \dots, h$$

El problema dual consiste en la minimización de las rentas a pagar por unidad de tierra residencial, así como la minimización del subsidio a pagar a las unidades familiares componentes del grupo "i" para que éstas a su vez tengan la capacidad de pagar la renta " $r^k$ " en caso de que el monto de esta última rebase el nivel del ingreso percibido por este grupo de unidades familiares. Esto se debe al requerimiento de que todas las unidades familiares deberán ser ubicadas en (asignadas a) un espacio de terreno residencial.

La mecánica del modelo consiste en postular que se establece una competencia entre las unidades familiares por la ocupación (ubicación) de terrenos residenciales. Esto tenderá a generar una tendencia hacia el incremento en el precio de la tierra. El modelo supone que existirá un grupo de unidades familiares que no podrá contar con ingreso suficiente para cubrir en su totalidad el gasto que representa la renta de la tierra residencial. Debido a lo anterior se presentará la necesidad de establecer un subsidio.

De acuerdo al problema de minimización se deberá minimizar el valor del subsidio sombra<sup>14/</sup> que se tendrá que pagar, dado un determinado nivel de ingreso, a las unidades familiares con in

<sup>14/</sup> Es decir, no se trata de un precio real.

gresos pequeños.

En este aspecto el problema es, más que de localización, de transporte. En primer lugar, se realizará una predicción de la localización de las unidades familiares. Como segunda etapa se realizará la proyección de la generación de viajes.

El problema de minimización se especifica, entonces, de la siguiente manera:

$$1^1) \quad \text{Min } Z^1 = \sum_{k=1}^u r^k L^k + \sum_{i=1}^n v_i (-N_i)$$

Sujeto a:

$$2^1) \quad S_i h^k - v_i \geq b_{ih} - c_{ih}^k$$

$$\text{y todo } r^k \geq 0 \quad (k = 1, 2, \dots, u)$$

$$\text{y } v_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, h)$$

- El primer término del segundo lado de la ecuación (1<sup>1</sup>) re presenta el monto total que se deberá cubrir, por parte de la comunidad, por concepto de renta de la tierra urbana, mientras que el segundo término representa el monto total de subsidio que sería necesario pagar a las unidades familiares con ingresos in suficientes.

El significado de la condición lateral es que la cifra que representa la renta unitaria menos el subsidio unitario no deberá ser inferior a la cifra que resulta de restar el presupuesto residencial unitario menos el costo residencial unitario. En otras palabras, se requiere que la utilidad residencial no resulte ser inferior al ahorro residencial.

Por lo que respecta a las condiciones

$$r^k \geq 0$$

$$y \quad v_i \geq 0$$

estas aseguran que no existen niveles negativos de renta, para satisfacer condiciones de estabilidad en el modelo. Finalmente, se observa que el subsidio puede ser, a nivel conceptual, positivo o negativo.

#### B.- GENERACION DE VIAJES.

La estimación de la generación de viajes es la siguiente etapa en la proyección de la demanda por servicios de transporte intraurbano de pasajeros, una vez que se ha logrado proyectar la localización residencial. La técnica para la estimación de la generación de viajes consiste fundamentalmente en suponer que las tasas de la generación de viajes dependen del tipo y de la intensidad de los usos de suelos, por lo que podemos pasar a la descripción del modelo general.

Sea:

$V_k$ : El número de viajes originados en el área o zona "k".

$Z_i^k$ : Un indicador de la actividad "i" en el área o zona "k".

$\bar{N}^k$ : Densidad de población en el área o zona "k".

Entonces:

$$V_k = f(Z_i^k, \bar{N}^k)$$

Donde la variable dependiente, el número de viajes, es una función de la mezcla de actividades económicas que se desarrollan en el área "k". Este modelo tiene la capacidad de abrirse

para tomar en cuenta las actividades familiares<sup>15/</sup> y los viajes que éstas pueden generar, además de los viajes generados por las actividades laborales. Esto constituye una ventaja puesto que los diferentes tipos de usos de suelos (familiar o residencial, industrial, comercial y de servicios) generan diferentes números de viajes por unidad.

El supuesto básico en que se apoya el modelo de generación de viajes es que existe la viabilidad de estimar el nivel de generación de viajes en cada una de las zonas aplicando parámetros específicos para cada uno de los usos de suelos. De esta manera, si se considera que el ajuste lineal es el mejor,<sup>16/</sup> tenemos:

$$V_k = a + bZ_1^k + cZ_2^k + dZ_3^k + eN^k + u$$

donde  $Z_1$ ,  $Z_2$  y  $Z_3$  son los indicadores de los niveles de actividad residencial, comercial e industrial, respectivamente.

Un problema grave que surge en la estimación y proyección de la generación de viajes, consiste en la dificultad para proyectar las necesidades de infraestructura urbana de transporte. Este problema surge debido a la característica del transporte urbano de que el flujo no es constante durante la jornada de trabajo, sino que se presente el fenómeno de las "horas punta". Es decir, es evidente que en un período de 24 horas la distribución de los viajes en una zona urbana no es uniforme sino que normalmente ha

<sup>15/</sup> Tales como escolares, comunitarias o de utilización del tiempo libre.

<sup>16/</sup> Por ejemplo, después de haber ensayado una serie de ajustes diferentes y utilizar criterios de bondad de ajuste.

brá dos o tres<sup>17/</sup> períodos de alrededor de dos horas cada uno. Esta situación es la que produce el problema de la infraestructura urbana. De acuerdo a estas consideraciones, se plantean dos soluciones alternativas:

- 1.- Estimar el volumen total de tránsito en el período de 24 horas y suponer que el flujo de viajes presente una distribución uniforme a lo largo de la jornada de trabajo.
- 2.- Diseñar la infraestructura de transporte con una capacidad adecuada para atender el tránsito que se genera en las horas punta y, evidentemente, contar con capacidad ociosa el resto de la jornada.

El dilema está entonces en decidir entre dos males, a saber: Optar por la primera solución, provocando el problema de la congestión en las horas punta, con sus concomitantes de pérdida de tiempo, consumo de energéticos, problemas de salud física y mental de los habitantes de la ciudad y mayores niveles de contaminación ambiental, o bien decidirse por la segunda solución, diseñando una infraestructura con capacidad suficiente para atender las necesidades de las horas punta, e incurrir en el costo social de realizar elevadas inversiones y de contar con capacidad ociosa la mayor parte del tiempo. La elección dependerá de la conjunción de factores económicos (disponibilidad de recursos financieros a bajo costo y pagaderos a largo plazo), físicos (la topografía

<sup>17/</sup> Esto depende de las características de la demanda: En las áreas urbanas de los países industrializados, dada la costumbre ya establecida de trabajar horarios corridos, se presentan dos "horas punta". En países en vías de desarrollo el problema del transporte urbano es aún más grave, puesto que aún impera el sistema de horarios cortados, con un receso para la comida del mediodía y donde, por consecuencia, pueden presentarse tres y hasta cuatro horas punta.

fía de la ciudad y la distribución de las actividades sobre el terreno urbano), políticas (capacidad de negociación de los transportistas y de los usuarios de los medios de transporte vis a vis de la capacidad de negociación de los propietarios de terrenos e inmuebles urbanos), etc.

### C. MODELOS DE FLUJO ENTRE ZONAS.

En esta tercera etapa en el proceso de estimación de la demanda por transporte urbano de pasajeros generalmente se comienza graficando los flujos reales<sup>18/</sup> de viajes sobre la red de infraestructura de transporte en base a los patrones observados de orígenes y destinos de los viajes. Por lo general este paso se efectúa por medio de estudios de campo, ya sea utilizando la técnica de encuesta por muestreo a las unidades familiares, o bien a través de conteos de cordón (estudios de anforas) o, en fin, una combinación de ambas técnicas.

A partir de estas observaciones, revisaremos aquí tres tipos diferentes de métodos o modelos que se pueden emplear para la estimación de los futuros flujos entre zonas en el área urbana que se está estudiando, es decir:

- Método de Expansión de Fratar.
- Modelo de Gravedad.
- Modelo de Oportunidades Intermedias.

Este método de expansión de Fratar<sup>19/</sup> consiste en una expansión lógica de la idea del factor de crecimiento y tiene la

18/ Es decir, los viajes presente, observados.

19/ Véase Fratar, T.J.: "Forecasting Distribution of Interzonal Vehicular Trips by Successive Approximations" en *Proceedings of the 33rd Annual Meeting, January 1954, Vol. 33, Highway Research Board, Washington, D.C. 1954.*

ventaja de ser capaz de corregir el error en que se incurre cuando no se toma en consideración que las diferentes áreas o sectores de una ciudad crecen en forma diferente, de tal manera que tanto la generación de viajes como el intercambio entre zonas van a diferir en forma considerable de acuerdo al crecimiento experimentado por cada una de las áreas en particular. En este método las proyecciones de los flujos entre zonas se derivan tanto a partir de los flujos observados como de los factores de crecimiento que se asigna a cada una de las áreas o sectores que componen la ciudad. Es decir, en tanto que se utilizan los factores diferenciales de crecimiento, se elimina el supuesto de que la estructura de flujos entre zonas permanece constante y que solamente aumenta el volumen de los mismos, o sea que no se requiere suponer que las direcciones de los viajes entre un área o sector determinado y el resto de los sectores, permanece inalterado.<sup>20/</sup>

La ecuación que representa el modelo de Fratar es la siguiente:

$$T_{ij}^* = T_{ij} \frac{\sum_{j=1}^n T_{ij} G_j}{\sum_{j=1}^n T_{ij} G_j}$$

Donde:

$T_{ij}^*$  = Intercambio entre Zonas Total Futuro.

$T_{ij}$  = Intercambio entre Zonas Total Presente.

$G_j$  = Factor de Crecimiento de la Zona "j"

20/ Supuesto que en realidad es inadmisibles para el caso de áreas urbanas en desarrollo.

La variable crucial  $G_j$  es la proporción de crecimiento en la generación de viajes, es decir que:

$$G_j = \frac{T_{ij}^*}{T_{ij}}$$

De aquí resulta la proyección de los viajes futuros entre un área "i" y un área "j".

Como insumos de información estadística para el modelo, obviamente, es necesario contar con los valores de  $G_i$  y de  $G_j$  - actuales, es decir, que debemos contar con:

$$G_i = \frac{(T_{ij})}{(T_{ij})^{t-1}}$$

y

$$G_j = \frac{(T_{ji})}{(T_{ji})^{t-1}}$$

Donde (t-1) representa el período anterior.

El Modelo de Física Social o de Gravedad.- Este modelo es el que se utiliza en mayor medida para la proyección de los flujos entre zonas de un área urbana. Determina un conjunto de flujos con origen en un punto<sup>21/</sup> dado y con destino en cualquier otro punto perteneciente al área urbana bajo estudio.

Los viajes que se originan en un punto del área urbana están en función de los posibles destinos de esos mismos viajes. La formulación general del modelo relaciona los viajes que se originan en un lugar con un factor de atracción hacia todos los demás lugares y con un factor de fricción representado por los costos de transporte o bien por la distancia medida en tiempo, en costo

<sup>21/</sup> El centro gravitacional de un sector del área urbana, p. ej.

o en kilómetros, donde los respectivos coeficientes pueden estimarse por medio de análisis de regresión. El modelo más sencillo nos determina el número total de viajes que se originan a partir de un lugar "i" hacia un lugar "j" ( $T_{ij}$ ) como directamente proporcional al número total de viajes que se originan en el lugar "i" ( $T_i$ ). Es también directamente proporcional al número total de viajes que son atraídos al lugar "j" ( $A_j$ ). En fin, es inversamente proporcional a la distancia entre el lugar "i" y el lugar "j" ( $D_{ij}^b$ ),<sup>22/</sup> estandarizado por el número total de totales de los "viajes de destino" (es decir, de los  $A_j$ ) divididos sobre sus respectivas distancias ( $A_j/D_{ij}^b$ ).

$$T_{ij} = k T_i \frac{A_j/D_{ij}^b}{\sum_{j=1}^m A_j/D_{ij}^b}$$

Donde:

$$T_i = \sum_{j=1}^m T_{ij}$$

$T_{ij}$ : Número de viajes que tienen por origen el punto "i" y por destino el punto "j".

$T_i$ : Número de viajes que se originan en el punto "i".

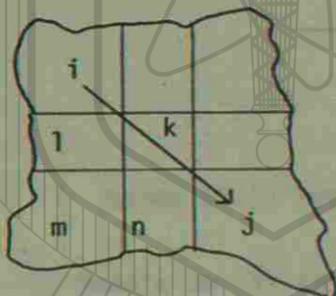
En este modelo, los parámetros a estimar son:

- k: Factor de proporción del total de viajes originados.
- b: Factor de proporcionalidad de la variable de fricción (del costo de traslado).

<sup>22/</sup> La potencia "b" de la variable distancia en un parámetro a determinar.

El Modelo de Oportunidades Intermedias.<sup>24/</sup> Este es un modelo probabilístico cuyo principio general es el siguiente: A cada destino se le asigna una probabilidad de ser aceptado y para cada origen se minimiza el tiempo total de viaje, condicionado a que todo destino posible sea tomado en cuenta, de tal manera que un determinado viaje que se origina en el lugar o punto "i" tiene una probabilidad menor de tener como destino un lugar "j" mientras mayor sea el número de lugares que se interponen, en el área bajo estudio, entre el origen "i" y el destino potencial "j".

En tanto que los modelos determinísticos toman en cuenta el número de viajes entre los puntos "i" y "j", no toman en consideración la existencia de lugares intermedios, tal como lo muestra la gráfica adjunta, donde se mide el viaje  $i \rightarrow j$  pero no se toma en cuenta la "oportunidad intermedia", es decir, la probabilidad de que el viaje termine en "k".



Pasando a la especificación del modelo de oportunidades intermedias tenemos:

$P(V_j)$  = Probabilidad total de que un viaje termine antes de llegar al destino potencial "j".

$V_j$  = El número de destinos potenciales ya considerados; es decir, el número de destinos que ya se tomaron en cuenta antes de llegar al destino "j". En otras palabras, es el número de destinos intermedios.

<sup>24/</sup> Las generalidades de este modelo se encuentran expuestas en el libro de Isard et. al. Op. Cit.

$L$  = Es la probabilidad (que se supone constante) de aceptación de un destino potencial en caso de ser considerado.

$T_{ij}$  : Es el intercambio esperado entre la zona o sector "i" y la zona o sector "j".

$O_i$  : Es el número de viajes que tienen su origen en el sector o zona "i".

Este modelo puede predecirnos el intercambio esperado entre los sectores "i" y "j" como función del número de viajes que tienen como su origen al sector "i" multiplicado por la probabilidad de que un viaje termine en el sector de destino "j", restando la probabilidad de que el viaje se detenga antes de llegar al sector de destino "j". De esta manera, la ecuación de oportunidades intermedias es:

$$T_{ij} = O_i [P(V_{j+1}) - P(V_j)]$$

o bien:

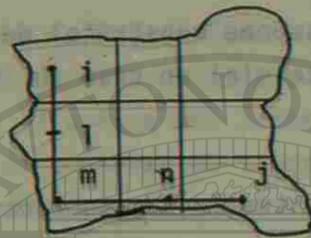
$$T_{ij} = O_i (e^{-L V_{j+1}} - e^{-L V_j})$$

donde  $P(V_j + 1)$  es la probabilidad de que el viaje se detenga en el destino "j" y  $P(V_j)$ , según se dijo, es la probabilidad de que el viaje se detenga antes de llegar al destino potencial "j".<sup>26/</sup>

$V_j + 1$  y  $V_j$  se pueden calcular de la manera siguiente: En el estudio de campo se procede a calcular el número total de viajes ( $O_{ij}$ ) de tal manera que, para el ejemplo de la gráfica,  $P(V_j)$  es igual a:

$$P(V_j) = \frac{V_l + V_m + V_n}{V}$$

<sup>26/</sup> Recuérdese que se trata de viajes que siempre se inician en el punto "j".



- Vl: Número de viajes de "i" a "l"
- Vm: Número de viajes de "i" a "m"
- Vn: Número de viajes de "i" a "n"
- Vj: Número total de viajes.

Por otra parte,  $P(V_{j+1})$  será igual a:

$$P(V_{j+1}) = \frac{V_l + V_m + V_n + V_j}{V}$$

La ecuación del indicador  $T_{ij}$  puede obtenerse mediante el empleo de la técnica de regresión múltiple con un modelo lineal.<sup>27/</sup> Se puede tomar a  $T_{ij}$  como el número de viajes reales entre los sectores "i" y "j". Ajustando el modelo de regresión podemos obtener el parámetro L de la ecuación.

En el ajuste del modelo se pueden seguir las etapas que a continuación se describen.

Primeramente, a través del estudio de campo se pueden obtener los indicadores,  $O_i, O_{ij}, V_{j+1}$  y  $V_j$ , donde las "O" indican viajes reales que se originan y las "V" indican viajes reales que terminan. Para  $V_j$  tendremos:

$$V_j = \frac{V_l + V_m + V_n + \dots + V_{j-1}}{V}$$

y donde "V" significa el gran total de viajes que terminan.

<sup>27/</sup> Dado que la ecuación  $T_{ij} = O_i (e^{-L V_{j+1}} - e^{-L V_j})$  se puede convertir en:  $\ln(T_{ij}) = -L (V_{j+1} \ln O_i) + L (V_j \ln O_i)$

En segundo lugar, una vez obtenidos los valores de  $O_{ij}$ , aplicamos análisis de regresión para estimar el parámetro "L", sujeto a la condición de que:

$$0 < L < 1$$

En tercer lugar se procede a proyectar " $O_i$ ", que de tal manera se convertirá en " $T_i$ " y de aquí pasamos a la proyección de " $T_{ij}$ ".

Por otra parte, cabe hacer notar que se puede realizar una mezcla de las ideas contenidas en el modelo de física social o gravedad y en el modelo de oportunidades intermedias. El modelo determinístico de física social puede convertirse en probabilístico, que puede especificarse de la siguiente manera:

$$\bar{T}_{ij} = k T_{ij} \frac{[P(A_{j+1}) - P(A_j)] / D_{ij}^b}{\sum_{i=1}^n [P(A_{j+1}) - P(A_j)] / D_{ij}^b}$$

• donde  $\bar{T}_{ij}$  es entonces una variable probabilística, diferenciada de la variable determinística  $T_{ij}$ .

#### D. SELECCION DE MEDIO DE TRANSPORTE.

Luego de proyectar el número y la dirección de los viajes en el área urbana, se procede a determinar la distribución entre medios de transporte para esos viajes.

Existe una serie de procedimientos destinados a estimar la división entre medios de transporte. El procedimiento que es conceptualmente más sencillo pero operativamente más difícil de realizar es el Modelo de Orígenes y Destinos según Medios de Trans

porte. Para este modelo tendríamos una variable  $T_{ij}$  para cada uno de los medios de transporte existente en el área urbana bajo estudio. Una segunda alternativa, más sencilla de practicar,<sup>28/</sup> sería el Modelo de Separación de Transporte según Medios,<sup>29/</sup> que a continuación pasamos a describir:

Sea:

$T_i^B$ : La proporción de viajes que se originan en el lugar o sector "i" utilizando el medio de transporte "B".

$A_i$ : Un indicador de tenencia (propiedad) de automóviles particulares en el lugar o sector "i".

$D_i$ : Densidad residencial (número de casas-habitación o de familias por kilómetro cuadrado, p. ej.) en ese mismo lugar.

Este modelo especifica que el total de viajes que se originan en el lugar o sector "i" utilizando el medio de transporte "B" es una función de la propiedad de automóviles particulares y de la densidad residencial, es decir:

$$1) T_i^B = \alpha_0 + \alpha_1 A_i + \alpha_2 D_i$$

Además, el número total de viajes que se originan en "i" y que tienen como destino a "j", utilizando el medio "B" constituye una fracción del gran total de viajes que se originan en "i",

<sup>28/</sup> Y que se aplica sobre todo en el caso de las áreas urbanas que carecen de sistemas de transporte masivo.

<sup>29/</sup> Véase: Meyer, J.R. (ed): *Techniques of Transport Planning*. Vol. I. Pricing and Project Evaluation. The Brookings Institution, Washington, D. C. 1971.

o sea:

$$2) T_{ij}^B = T_i^B (T_{ij})$$

Donde:

$T_{ij}^B$ : Fracción del total de viajes que se originan en "i" y terminan en "j" utilizando el medio "B".

$T_{ij}$ : Total de viajes con origen en "i" y destino en "j", - por todos los medios de transporte disponibles.

Para delimitar las fronteras de los sectores "i", "j",... "n" puede recurrirse a estimar la distancia máxima que el grueso de la población residente en el sector está dispuesta a desplazarse a pie, donde esta distancia máxima constituye la frontera del sector. Posiblemente, en una investigación real, tendrfa que recurrirse a un procedimiento iterativo.

#### E. COMENTARIOS ADICIONALES.

En relación con el problema de la localización residencial, J.R. Kain<sup>30/</sup> elabora un estudio sobre el comportamiento de las decisiones de localización residencial en función de los costos de transporte, enfocando hacia quienes tienen un lugar de trabajo - en el centro de la ciudad y que deben seleccionar un lugar de residencia, ya sea cercano o alejado del centro.

Kain propone un modelo formal en base a dos supuestos. Pri

<sup>30/</sup> Véase Kain, J.F.: "The Commuting and Residential Decisions of Central Business District Workers". en National Bureau of Economic Research: *Transportation Economics*. Columbia University Press. New York. 1968.

meramente, supone que el costo de la vivienda es una función descendente de la cercanía al centro comercial, es decir:

$$CV = f(Dc)$$

donde:

CV: Costo de la Vivienda.

Dc: Distancia de un determinado terreno habitacional al centro comercial.

En segundo lugar, Kain supone que las unidades de decisión (en este caso los consumidores de servicios de vivienda y transporte) optimizan su ingreso de tal manera que pueden obtener la mayor cantidad de servicios<sup>31/</sup> al costo mínimo posible. Los trabajadores pueden decidir entre ubicar su vivienda lejos de su lugar de trabajo, con lo cual el costo de la vivienda es bajo pero el costo de transporte es elevado, o bien ahorrar gastos en costo de transporte ubicándose en una residencia localizada más cerca del centro de la ciudad (que se supone el centro de trabajo) pero incurriendo en mayores costos de vivienda.

La elección del lugar de residencia por parte del trabajador tendrá una repercusión directa sobre el modo o medio de transporte. Además, existen cuatro factores para la decisión del medio de transporte a utilizar, a saber:

- 1.- Densidad de población en los lugares de residencia y en los lugares de trabajo.
- 2.- Costo en tiempo de trasladarse de la residencia al trabajo.

<sup>31/</sup> La vivienda no es considerada necesariamente como un bien homogéneo, puesto que las áreas destinadas a la construcción de vivienda tienen diferentes características.

3.- Status que tenga el trabajador en su lugar de trabajo.

4.- Costo de los energéticos.

Con respecto a las densidades de población, Kain observa que aquellos trabajadores que deciden residir en áreas menos densamente pobladas tienden a utilizar el automóvil, mientras que quienes deciden residir en áreas de mayor densidad de población tienden a hacer uso del transporte colectivo. Cabe hacer notar, sin embargo, que precisamente las áreas residenciales de menor densidad de población son las que se encuentran más alejadas del centro de la ciudad y viceversa, por lo que la observación de Kain en realidad carece de una explicación convincente sobre la relación entre densidad de población y selección de medio de transporte.

Es claro, por otra parte, que un mayor costo de los energéticos traerá como consecuencia un desplazamiento del automóvil - en favor de los medios de transporte colectivos. Puede ocurrir también una mayor densidad en el empleo del automóvil, ya que a mayor costo del combustible se forman grupos de vecinos que comparten sus vehículos (p. ej. se usa un solo vehículo en lugar de cuatro).

En el modelo de Kain la demanda por servicios de transporte está influida directamente por la densidad de población en el lugar de residencia, la distancia del lugar de residencia al centro de trabajo (centro de la ciudad), el tiempo de traslado y el costo de los energéticos, es decir:  $Tic = f(Di, dic, t, G)$

Donde:

Tic: La demanda por servicios de transporte del lugar "i" al centro "c" de la ciudad.

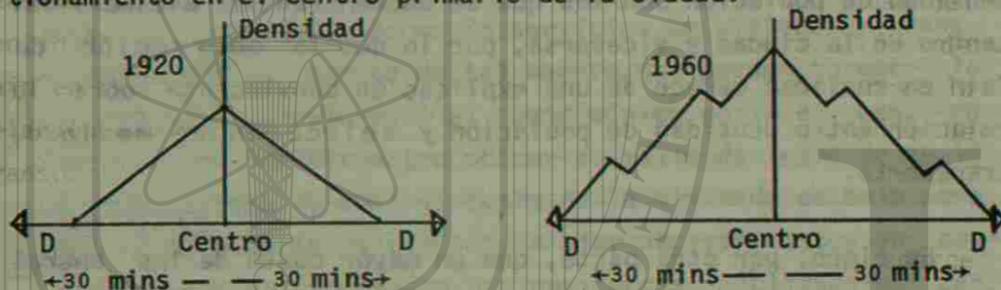
Di: Densidad de población en el lugar "i".

dic: Distancia entre el lugar "i" y el centro "c" de la ciudad.

t: Tiempo de traslado.

G: Costo de los energéticos.

Si bien Kain supone una estructura radial en las ciudades que analiza,<sup>32/</sup> es necesario comentar que la tendencia, con respecto a la densidad de población, es la de crear centros urbanos "auxiliares" para reducir los costos sociales asociados al congestionamiento en el centro primario de la ciudad.



Según lo indica la gráfica,<sup>33/</sup> mientras que en 1920 existía un solo centro y los límites del área económica funcional<sup>34/</sup> estaban determinados por la distancia que era posible recorrer, digamos X kilómetros, para 1960, conjuntando los fenómenos de una mayor densidad de población en el centro de la ciudad y el desarrollo tecnológico en las comunicaciones y los transportes, ocurre tanto la aparición de nuevos centros como una expansión en los límites del área económica funcional, que posibilita, en el mismo lapso de tiempo (30 minutos en el ejemplo), cubrir una distancia considerablemente mayor, tal como X+y kilómetros.

32/ Es decir, Detroit y Chicago.

33/ La cual constituye solamente un ejemplo ilustrativo.

34/ Para revisar este concepto ver: K.A. Fox y T.K. Kumar: "The Functional Economic Area". Papers and Proceedings of the Regional Science Association. 1967.

En este capítulo se realizan las consideraciones pertinentes y la exposición de los modelos analíticos relacionados con la demanda por servicios de transporte interurbano de pasajeros y de carga.

#### A.- EL TRANSPORTE INTERURBANO DE PASAJEROS.

Los estudios de la demanda por servicios de transporte interurbano de pasajeros generalmente se fundamentan en el modelo de gravedad, que se ha expuesto con anterioridad. Para esta modalidad del transporte el fundamento teórico resulta mucho más elemental que para el caso del transporte intraurbano. El procedimiento básico consiste en calcular, para cada uno de los medios de transporte, una ecuación que relacione el volumen o magnitud del flujo del origen hacia el destino, a través de medida de la capacidad de rechazo por parte del origen y de la capacidad de atracción por parte del lugar de destino.

A continuación pasamos a exponer uno de los modelos más sencillos para estimar la demanda por transporte interurbano de pasajeros.<sup>35/</sup> Se expresa primeramente la notación para en seguida especificar el modelo. Esto no es más que la adecuación de la hipótesis de gravedad al caso del transporte interurbano de pasajeros (lo cual demuestra la versatilidad de esta hipótesis).

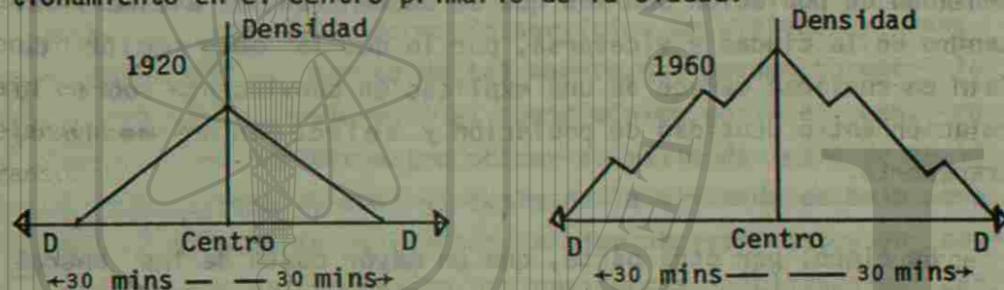
35/ Basado en Isard et al, Op. Cit.

dic: Distancia entre el lugar "i" y el centro "c" de la ciudad.

t: Tiempo de traslado.

G: Costo de los energéticos.

Si bien Kain supone una estructura radial en las ciudades que analiza,<sup>32/</sup> es necesario comentar que la tendencia, con respecto a la densidad de población, es la de crear centros urbanos "auxiliares" para reducir los costos sociales asociados al congestionamiento en el centro primario de la ciudad.



Según lo indica la gráfica,<sup>33/</sup> mientras que en 1920 existía un solo centro y los límites del área económica funcional<sup>34/</sup> estaban determinados por la distancia que era posible recorrer, digamos X kilómetros, para 1960, conjuntando los fenómenos de una mayor densidad de población en el centro de la ciudad y el desarrollo tecnológico en las comunicaciones y los transportes, ocurre tanto la aparición de nuevos centros como una expansión en los límites del área económica funcional, que posibilita, en el mismo lapso de tiempo (30 minutos en el ejemplo), cubrir una distancia considerablemente mayor, tal como X+y kilómetros.

32/ Es decir, Detroit y Chicago.

33/ La cual constituye solamente un ejemplo ilustrativo.

34/ Para revisar este concepto ver: K.A. Fox y T.K. Kumar: "The Functional Economic Area". Papers and Proceedings of the Regional Science Association. 1967.

En este capítulo se realizan las consideraciones pertinentes y la exposición de los modelos analíticos relacionados con la demanda por servicios de transporte interurbano de pasajeros y de carga.

#### A.- EL TRANSPORTE INTERURBANO DE PASAJEROS.

Los estudios de la demanda por servicios de transporte interurbano de pasajeros generalmente se fundamentan en el modelo de gravedad, que se ha expuesto con anterioridad. Para esta modalidad del transporte el fundamento teórico resulta mucho más elemental que para el caso del transporte intraurbano. El procedimiento básico consiste en calcular, para cada uno de los medios de transporte, una ecuación que relacione el volumen o magnitud del flujo del origen hacia el destino, a través de medida de la capacidad de rechazo por parte del origen y de la capacidad de atracción por parte del lugar de destino.

A continuación pasamos a exponer uno de los modelos más sencillos para estimar la demanda por transporte interurbano de pasajeros.<sup>35/</sup> Se expresa primeramente la notación para en seguida especificar el modelo. Esto no es más que la adecuación de la hipótesis de gravedad al caso del transporte interurbano de pasajeros (lo cual demuestra la versatilidad de esta hipótesis).

35/ Basado en Isard et al, Op. Cit.

Sea:

$V_{ij}^{mp}$  : Número de viajes del lugar (ciudad) de origen "i" al lugar (ciudad) de destino "j" por el medio de transporte "m" y con el propósito o motivo "p".<sup>36/</sup>

$d_{ij}$  : La distancia entre los lugares "i" y "j" medida en términos de costo, dado que para el caso del transporte interurbano los diferenciales de costo entre los distintos medios de transporte son muy amplios, lo que no ocurre en el caso de transporte intraurbano.

$A_i(P)$ : Medida de la actividad "P" en el lugar de origen.

$A_j(P)$ : Medida de la actividad "P" en el lugar de destino.

$w_i, w_j$ : Factores de ponderación para los lugares de origen y destino, respectivamente.

La selección de estos factores de ponderación depende de la actividad "P" que se esté analizando en el estudio. Así, por ejemplo, si se está considerando la demanda por transporte con el propósito de vacaciones, una ponderación adecuada sería la capacidad de gasto de la población. O bien si existen ciudades de tamaños muy diferentes, sería conveniente utilizar ponderaciones para eliminar el efecto "tamaño de ciudad" sobre las estimaciones de número de viajes.<sup>37/</sup>

<sup>36/</sup> Esta última especificación es opcional para el modelo pudiendo definir la variable como  $V_{ij}^m$

<sup>37/</sup> Puesto que lo importante, para la generación de viajes, no es el tamaño de las ciudades, sino la magnitud de las actividades A(P).

El modelo en sí sería:

$$V_{ij}^{mp} = \frac{(w_i A_i^\alpha) (w_j A_j^\beta)}{d_{ij}^\gamma}$$

Convirtiendo esta ecuación en su expresión lineal tendríamos:

$$\ln(V_{ij}^{mp}) = \alpha \ln(w_i A_i) + \beta \ln(w_j A_j) - \gamma \ln(d_{ij})$$

De esta manera es posible ajustar la ecuación y encontrar los parámetros  $(\alpha, \beta, \gamma)$  por medio del análisis de regresión múltiple sobre estadísticas históricas.

La etapa siguiente consiste en obtener proyecciones para las medidas de las actividades  $A_i$  y  $A_j$ , con el propósito de contar con el insumo estadístico necesario para proyectar  $V_{ij}^{mp}$ .

Es conveniente, para mayor precisión y seguridad en las proyecciones de  $V_{ij}$ , estudiar las ponderaciones  $(w_i, w_j)$  y decidir si es necesario realizar ajustes a futuro; en otras palabras, es necesario decidir si se requiere proyectar también las ponderaciones.

Ahora bien, el empleo del modelo general de gravedad tiene el inconveniente de que se requiere emplear insumos de información estadística que resultan difíciles de obtener, siendo así un método costoso tanto en tiempo como en recursos de investigación.

Un modelo alternativo para el análisis de la demanda inter

urbana por transporte de pasajeros en el de Quandt y Baumol.<sup>38/</sup> Este, que generalmente se denomina "Modelo Abstracto", tiene la ventaja de poder representar, en una sola ecuación, las características de selección y empleo de medio de transporte por parte de la totalidad de los pasajeros que están siendo estudiados. Es decir, este modelo condensa en una sola ecuación la información correspondiente a todos los medios de transporte. Este representa una ventaja sobre el modelo de gravedad, puesto que, para un cierto número de pares de lugares de origen y de destino, solamente se tendría que contar con un juego de datos estadísticos igual al número de pares<sup>39/</sup> multiplicado por el número de medios de transporte incluidos en el estudio.

Supongamos, por ejemplo, que deseamos estudiar los flujos de transporte de pasajeros entre cinco ciudades, tomando en cuenta tres diferentes medios de transporte. Se generan diez pares de ciudades para viajar de ida y diez pares en el caso de viajes de regreso. En el modelo abstracto tendremos entonces 20 pares de ciudades, lo que multiplicado por 3 medios de transporte nos arroja finalmente una ecuación de 60 observaciones. En cambio, en el caso del modelo de gravedad tendríamos que desarrollar tres ecuaciones de 20 observaciones cada una, puesto que sería indispensable ajustar una ecuación para cada uno de los medios de transporte.

Además de la ventaja de tener que ajustar una sola ecuación, se obtiene una mayor precisión en la estimación de los parámetros, puesto que el número de observaciones es mucho mayor

38/ Véase: Quandt, R.E. & W. Baumol: "The Demand for Abstract Transport Modes: Theory and Measurement". *Journal of Regional Science*. Vol. 6 (Winter 1966)

39/ Es decir, de pares de lugares de origen y de destino.

y, al mismo tiempo, la mezcla de los datos estadísticos correspondientes a los tres diferentes medios de transporte tiende a reducir la probabilidad del problema de la multicolinealidad de las variables independientes.<sup>40/</sup>

El modelo abstracto puede ser descrito de la siguiente manera:

Sea:

$i, j$ : Puntos nodales (ciudades)

$k$ : Medios de transporte.

$T_{ijk}$ : Número de viajes entre "i" y "j" utilizando el medio de transporte "k"

$P_i, P_j$ : Poblaciones de la ciudad "i" y de la ciudad "j", respectivamente.

$r_{ij}$ : Medida de ingreso. En este caso se utiliza el ingreso medio ponderado de la ciudad "i" y la ciudad "j".

$H_{ij}^b$ : Tiempo mínimo de viaje entre las ciudades "i" y "j", donde el superíndice "b" indica mínimo.<sup>41/</sup>

$H_{ijk}^r$ : Tiempo de viaje en el medio de transporte "k" entre las ciudades "i" y "j", dividido sobre el tiempo mínimo de viaje  $H_{ij}^b$ .

$C_{ij}^b$ : Costo mínimo de viaje entre las ciudades "i" y "j".

$C_{ijk}^r$ : Costo de viaje en el medio de transporte "k" entre las ciudades "i" y "j", dividido sobre el costo mínimo de viaje  $C_{ij}^b$ .

40/ En el caso del modelo de gravedad, cada ecuación contaría con un número relativamente pequeño de observaciones.

41/ Podría tratarse, por ejemplo, del tiempo de viaje por avión entre estas ciudades.

$D_{ij}^b$ : Frecuencia máxima de salidas de la ciudad "i" a la ciudad "j" (esta variable no aparece en el modelo en forma explícita).

$D_{ijk}^r$ : Frecuencia de salidas del medio "k" de la ciudad "i" hacia la ciudad "j" dividido sobre la frecuencia máxima de salidas  $D_{ij}^b$ .

La Ecuación del modelo de medio abstracto es entonces:

$$T_{ijk} = \alpha_0 (P_i)^{\alpha_1} (P_j)^{\alpha_2} (C_{ij}^b)^{\alpha_3} (C_{ijk}^r)^{\alpha_4} (H_{ij}^b)^{\alpha_5} (H_{ijk}^r)^{\alpha_6} (D_{ijk}^r)^{\alpha_7} (Y_{ij})^{\alpha_8}$$

En este modelo, las poblaciones en el origen y en el destino representan el factor de rechazo y el factor de atracción, respectivamente.<sup>42/</sup> Las variables "C", por su parte, representan el costo en tiempo. La variable "D" representa el grado o nivel de calidad de servicio que puede ofrecer el medio de transporte "k".<sup>43/</sup> En fin, la inclusión de la variable "Y" asegura la incorporación del factor de ingreso disponible para la estimación de la demanda por servicio de transporte.

Linealizando el modelo mediante el empleo de logaritmos naturales tenemos:

$$\ln(T_{ij}) = \ln \alpha_0 + \alpha_1 \ln(P_i) + \alpha_2 \ln(P_j) + \alpha_3 \ln(C_{ij}^b) + \alpha_4 \ln(C_{ijk}^r) + \alpha_5 \ln(H_{ij}^b) + \alpha_6 \ln(H_{ijk}^r) + \alpha_7 \ln(D_{ijk}^r) + \alpha_8 \ln(Y_{ij})$$

En esta forma se puede practicar un ajuste de regresión lineal múltiple.

<sup>42/</sup> Con estos elementos queda incorporada la hipótesis fundamental del modelo de gravedad.

<sup>43/</sup> Obviamente se puede pensar en medidas alternativas para la calidad del servicio.

El supuesto subyacente al modelo de Quandt y Faumol consiste en que los pasajeros seleccionan el medio de transporte mediante comparaciones con el medio de transporte que resulte ser el óptimo para cada uno de los tres factores a considerar en la demanda, es decir: costo monetario, costo en tiempo de traslado y calidad en el servicio.

Tal vez sería conveniente tratar de aclarar la exposición de este modelo mediante un ejemplo. Supongamos que se desea realizar un estudio del transporte de pasajeros entre cinco de las principales ciudades del país, que podrían ser el Distrito Federal, Guadalajara, Monterrey, Puebla y Ciudad Juárez y que los medios de transporte fuesen el avión, el ferrocarril y el autobús.

En estas circunstancias el número de observaciones en el modelo sería de 60, puesto que tenemos 20 pares de ciudades,<sup>44/</sup> y 3 diferentes medios de transporte. La información necesaria para el ajuste de la ecuación podría ordenarse en un cuadro como el que aparece en la página siguiente, donde se establece el valor que toman todas las variables para cada uno de los 60 casos.

Donde:

$T_{ij}$ : Número mensual de pasajeros (miles).

$P_i, P_j$ : Población (millones de habitantes).

$C_{ij}^b$ : Costo de un pasaje de ida en el medio de costo mínimo (pesos).

$C_{ijk}^r$ : Razón del costo de un pasaje de ida en el medio de transporte utilizado sobre  $C_{ij}^b$ .

<sup>44/</sup> En este caso el par "i-j" sería diferente el par "j-i"; es decir, es un caso de permutaciones y no de combinaciones.



ción de la demanda por los servicios de la demanda por los ser  
vicios de medios de transporte específicos.

Es evidente que estos modelos comparten los problemas inhe-  
rentes a todo modelo de regresión por mínimos cuadrados, es de  
cir, multicolinealidad, autocorrelación de errores, problemas  
de especificación de variables, etc.

Pasamos ahora a la exposición de un modelo simple para la  
estimación de la demanda por transporte aéreo.<sup>46/</sup> El modelo in-  
corpora las siguientes variables:

Sea:

RPM: Volúmen de Demanda por Transporte. Estaría represen-  
tado por el dato (indicador) de ingreso total en

FARE: Tarifa Real.

Ingreso por Km./Pasajero, deflactado por el índice  
de precios al consumidor.

DPI: Ingreso Personal Disponible (que también se puede -  
deflacionar para tener el Ingreso Personal Real Dis-  
ponible).

La especificación del modelo sería la siguiente:

$$1) \text{ RPM} = \alpha \text{ FARE}^{\beta} \text{ DPI}^{\gamma}$$

Para mejorar el nivel de precisión que puede obtenerse en  
la estimación de los parámetros puede agregarse una variable re-  
presentativa de la tendencia (TIME) con lo que el modelo modifi-

<sup>46/</sup> Véase: U.S. Civil Aeronautics Board: "Measuring the Elasti-  
city of Air Passenger Demand: A Study of Changes over Time  
from 1953 to 1964" Washington, D. C. Feb. 1966.

cado vendría a ser:

$$2) \text{ RPM} = \alpha^1 \text{ FARE}^{\beta^1} \text{ DPI}^{\gamma^1} \text{ TIME}^{\phi}$$

linealizando la ecuación podríamos expresarla de la siguiente -  
manera:

$$2^1) \ln(\text{RPM}) = \alpha^1 + \beta^1 \ln(\text{FARE}) + \gamma^1 \ln(\text{DPI}) + \phi \ln(\text{TIME})$$

#### B.- EL TRANSPORTE INTERURBANO DE CARGA.

En el análisis de la demanda por servicios de transporte in-  
terurbano de carga examinaremos dos técnicas generales de proyec-  
ción. Ambas técnicas comparten la característica de tener la ca-  
pacidad de proporcionar proyecciones para cada medio de transpor-  
te.<sup>47/</sup>

Las técnicas que revisaremos en esta ocasión son las siguien-  
tes:

1o.- Análisis Insumo-Producto.

2o.- Programación Lineal.

Según se comprenderá posteriormente, ambas técnicas no son  
en realidad mutuamente excluyentes; por ejemplo, en el empleo  
de la programación lineal puede utilizarse la información bási-  
ca que se encuentra en los cuadros Insumo-Producto.

En referencia a la primera de las técnicas, sabemos que la  
matriz de coeficientes técnicos contiene, como información bási-  
ca, la cantidad de producto de un determinado sector que se re-  
quiere para lograr producir una unidad del producto de cualquier  
otro sector. ®

<sup>47/</sup> El grueso de los usuarios utiliza por lo general el ferro-  
carril o el servicio de camiones.





lo que sería necesario contar con las proyecciones de las magnitudes incorporadas en el sector de la demanda final, es decir, contar con proyecciones del Producto Nacional Bruto (PNB) y sus componentes.

Es claro que tal ejercicio implica la adopción de dos supuestos; a saber:

- 1o.- Que los coeficientes técnicos (los elementos "a") son constantes (en una economía en la que el progreso tecnológico y las variaciones en los patrones de la demanda final fuesen lentos, la validez de este supuesto sería mayor que en el caso de una economía que experimentase un proceso de transformación rápida).
- 2o.- Que las relaciones entre volumen y valor permanecieran constantes.<sup>52/</sup>

El empleo de estos dos supuestos<sup>53/</sup> permitirá derivar con facilidad las proyecciones de la demanda por transporte interregional e intraregional.

El Modelo de Programación Lineal.- Pasamos ahora a examinar la segunda técnica utilizada en el análisis de la demanda por transporte interurbano de carga. Este modelo, desarrollado originalmente por R. Quandt, intenta resolver el problema de minimizar el costo total de los servicios de transporte en una red compuesta por puntos iniciales y terminales conectadas entre sí por una serie de líneas y donde, para propósitos de exposición, suponemos que existe únicamente un medio de transporte (esto en la inteligencia de que la inclusión de dos o más medios de trans-

<sup>52/</sup> En otras palabras, se supone una constancia en los precios relativos de todas las mercancías.

<sup>53/</sup> Que en realidad son comunes a cualquier empleo de la técnica.

porte resultaría conceptualmente sencillo, existiendo solamente el problema de obtención y manejo de un mayor volumen de información estadística).

Para la especificación del problema, suponemos que existe un espacio geográfico que consta de  $n + m$  puntos, donde:

- $n$ : Orígenes o fuentes ( $i=1,2,\dots,n$ )
- $m$ : Destinos ( $j=n+2,\dots,n+m$ )
- $n+m$ : Nodos (orígenes y destinos)
- $P_{ij}$ : Costo unitario de transportar las mercancías de la fuente "i" al destino "j".

(Para propósitos de exposición, se supone que estos costos son constantes, es decir, que no existen costos de congestión, dado que en este caso  $P_{ij}$  sería una función del volumen de carga transportada entre el origen "i" y el destino "j").<sup>54/</sup>

- $X_{ij}$ : Volumen de carga transportada entre los puntos "i" y "j".
- $C_{ij}$ : Capacidad instalada o de conexión en la línea i-j.
- $K_{ij}$ : Aumento planeado en la capacidad de la línea i-j.
- $K_i$ : Capacidad de embarque instalada en la fuente "i".
- $R_{ij}$ : Requerimiento en volumen de carga demandado por el destino "j".

En esta aplicación particular de la técnica de programación lineal se trata de estimar el volumen de carga transportada entre cada uno de los orígenes y cada uno de los destinos con el ulterior objetivo de política económica de decidir acerca de la

<sup>54/</sup> En este caso tendríamos  $P_{ij}=f(X_{ij})$ , es decir, el costo unitario como función del volumen de carga transportada. Esto generaría un problema de programación no lineal.

magnitud de la ampliación en la capacidad de transporte del sistema. En otros términos, se trata de proyectar el volumen futuro de carga para tomar la decisión de ampliar (y, de ser así, en qué medida) o no la capacidad de la red.

El modelo incorpora las siguientes variables adicionales:

$r_{ij}$ : Costo por unidad de tiempo resultante de aumentar la capacidad de la línea entre "i" y "j" por una unidad (adicional) de volumen por unidad de tiempo.

$r_{ij}^1$ : Costo de capital resultante de un aumento unitario en la capacidad de la línea entre "i" y "j".

$\phi$ : Tasa de interés.

De lo anterior resulta:

$$r_{ij} = (r_{ij}^1) \phi$$

- Es decir, el costo por unidad de tiempo y volumen de incrementar la capacidad de la línea es igual al costo de capital multiplicado por el tipo de interés ( $\phi$ ) que la autoridad encargada de la ejecución del proyecto paga por el financiamiento del mismo ( $\phi$  no es necesariamente una tasa de interés de mercado, puesto que por lo general los proyectos de construcción de obras públicas pagan tasas de interés más bajas que las vigentes en el mercado financiero).

Continuando con la definición de variables:

M: Cantidad de dinero que se ha apropiado para la expansión de la red.<sup>55/</sup>

<sup>55/</sup> Esta magnitud podría tratarse como incógnita a resolverse por el programa. Quandt, sin embargo, la trata como una magnitud predeterminada.

Una vez que se ha decidido apropiar la cantidad M para la construcción (o, más propiamente, expansión) de redes de transporte, lo que se trata de realizar es la minimización, para cada uno de los orígenes y los destinos, del costo de transportar los volúmenes de carga.

De este modo, la especificación del problema de programación lineal será:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=n+1}^{n+m} P_{ij} X_{ij}$$

Sujeto a:

$$1) \sum_{j=n+1}^{n+m} X_{ij} \leq K_i$$

Esta condición establece que los volúmenes de carga transportada desde los puntos "i", en su sumatoria total, no excedan a la capacidad de embarque,  $K_i$ .

La expresión (1) es equivalente a:

$$1^1) \sum_{j=n+1}^{n+m} X_{ij} \geq -K_i$$

Esta formulación de la misma condición resulta adecuada para la forma en que se especifica el problema.

$$2) k_{ij} - X_{ij} \geq -c_{ij}$$

Esta segunda condición exige que el aumento planeado en la capacidad de la red, menos el volumen actual transportado, no debe ser menor que el negativo a la capacidad existente. Conceptualmente resulta mejor expresar esta condición de

la siguiente manera:

$$2) \quad X_{ij} - k_{ij} \leq c_{ij}$$

Es decir, que la capacidad actual no debe ser inferior al excedente del volumen de carga actual menos el nivel planeado. Imponiendo esta restricción tratamos de asegurar que, si no existe problema de congestión en la red, no será necesario llevar a cabo la ampliación en la misma. En otras palabras, debe existir una relación directa entre capacidad instalada actual y volumen actual de tránsito en la red.<sup>57/</sup>

El sentido de la restricción (2<sup>1</sup>) puede quedar más claro si la expresamos en términos de ecuación:

$$X_{ij} - k_{ij} = c_{ij},$$

o bien,

$$k_{ij} = X_{ij} - c_{ij}$$

O sea que el aumento planeado en la capacidad de la red deberá ser igual al exceso del uso de la red sobre la capacidad instalada de la misma.

$$3) \quad \sum_{i=1}^n X_{ij} \geq R_j$$

Esto indica que el requerimiento en volumen de carga demandado por el destino "j" no debe ser mayor que el volumen enviado efectivamente por los orígenes.

<sup>57/</sup> La red en sí se define como el conjunto de carreteras más el conjunto de instalaciones de embarque y de almacenamiento.

La cuarta condición lateral establece que la cantidad de recursos financieros (M) destinada a ser invertida en el proyecto no debe ser menor que la suma, para todos los orígenes y todos los destinos, de los costos totales en la expansión de las líneas. Es decir, el presupuesto asignado deberá ser suficiente para cubrir los costos que se deriven de la expansión en la capacidad instalada de todas las líneas.

$$4) \quad M \geq \sum_{i=1}^n \sum_{j=n+1}^{n+m} r_{ij} k_{ij}$$

En resumen, el problema planteado de minimizar el costo total de transporte en una red determinada, y permitiendo la posibilidad de ampliaciones en la misma, quedaría expresado en la forma siguiente:

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=n+1}^{n+m} P_{ij} X_{ij}$$

S.A.

$$1) \quad \sum_{j=n+1}^{n+m} X_{ij} \geq K_i$$

$$2) \quad K_{ij} - X_{ij} \geq c_{ij}$$

$$3) \quad \sum_{i=1}^n X_{ij} \geq R_j$$

$$4) \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=n+1}^{n+m} r_{ij} K_{ij} \geq M$$

La solución a este tipo de problema de optimización puede realizarse mediante el empleo del método simplex.

Al igual que al cualquier otro problema de optimización, a este problema corresponde un dual, que consistiría en maximizar la utilidad total imputada proveniente de la actividad de transporte, suponiendo que se mantiene constante la capacidad de la red. En este caso los maximandos serían los valores imputados del empleo de las instalaciones de transporte. De tal manera se hace posible derivar un valor imputado proveniente de la actividad total de transporte; restando a los ingresos totales los costos de transporte, podemos derivar la utilidad imputada.

Las variables pertenecientes al problema dual son las que a continuación se especifican:

- $u_i$ : El precio imputado de la carga en el punto de origen (fuente) "i".
- $v_j$ : El precio imputado de la carga en el punto de destino "j".
- $w_{ij}$ : Peaje imputado (precio sombra) por el uso de la línea "i-j".<sup>58/</sup>
- $T$ : Tasa de interés imputada (otro precio sombra). Esta variable mide la reducción en el costo de transporte que podría lograrse en caso de emplear una unidad monetaria adicional en la ampliación de la capacidad de la línea.

De esta manera, el problema sería:

$$\text{Max} - \left( \sum_{i=1}^n u_i K_i \right) + \left( \sum_{j=1}^{n+m} v_j R_j \right) - \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=n+1}^{n+m} w_{ij} C_{ij} - TM \right)$$

<sup>58/</sup> Evidentemente, en caso de existir peajes en el sistema,  $w_{ij}$  sería un valor real.

Donde:

- $u_i K_i$ : Es el valor total imputado de la carga en el origen o fuente "i".
- $v_j R_j$ : Es el valor total imputado de la carga en el destino "j".
- $w_{ij} C_{ij}$ : Es el costo imputado de transporte y
- $TM$ : Sería el total de la reducción en el costo de transporte resultante de aplicar una cantidad  $M$  en la ampliación de la red de transporte.

Es decir, con este ejercicio se trata de maximizar la diferencia entre el incremento total que experimenta el valor de las mercancías al pasar de los orígenes de los destinos, restando el costo en que se incurre al desarrollar la actividad de transporte.

Así, el problema de maximización sería:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^{n+m} v_j R_j - \sum_{i=1}^n u_i K_i - \sum_{i=1}^n \sum_{j=n+1}^{n+m} w_{ij} C_{ij} - TM$$

Sujeto a:

$$a) -u_i + v_j - w_{ij} \leq p_{ij}$$

$$b) w_{ij} - (r_j^1) T \leq 0$$

Nuestra primera condición lateral implica que la utilidad neta unitaria después del pago de peajes, sobre cada una de las rutas, no deberá exceder al costo real unitario de transporte - sobre esa misma ruta. ®

Por otro lado, la condición lateral (L) significa que el costo unitario imputado de transporte no debe exceder al ahorro

unitario de costo de capital para cada una de las rutas. En otros términos, el "peaje sombra" no debe exceder al "ahorro sombra" en costo de capital (todo lo anterior expresado en términos unitarios).

El problema de optimización puede también expresarse de manera más completa, agregando en la definición del problema las restricciones pertinentes. Así, por ejemplo, se puede agregar el problema de determinar la construcción de nuevas instalaciones terminales. En este caso, el procedimiento sería sencillo, siendo suficiente agregar al problema primario (de minimización) las siguientes dos condiciones laterales:

$$5) - \sum_{i=1}^{n+m} \sum_{j=1}^{n+m} X_{ij} - \sum_{i=1}^{n+m} X_{ij} + T_i \geq - Q_i$$

Donde:

$Q_i$ : Es la capacidad instalada de la terminal en cualquiera de los puntos ( $i=1, \dots, n+m$ )

$T_i$ : Es el incremento planeado en la capacidad instalada en el punto "i".

$\sum_{i=1}^{n+m} \sum_{j=1}^{n+m} X_{ij}$  Es el volúmen de mercancías que ya se transporta entre orígenes y destinos y entre destinos y orígenes.

Esta condición lateral especifica que debe existir una relación entre volumen de carga transportada, capacidad instalada y capacidad planeada. De esta relación dependerá la magnitud en la que se vaya a incrementar la capacidad de la red.

$$6) - \sum_{i=1}^{n+m} S_i T_i - M_2 \geq 0$$

Donde:

$S_i$ : Es el costo de unidades monetarias resultante de aumentar la capacidad instalada de la terminal en una unidad.

$T_i$ : Es el incremento planeado en la capacidad instalada de la terminal.

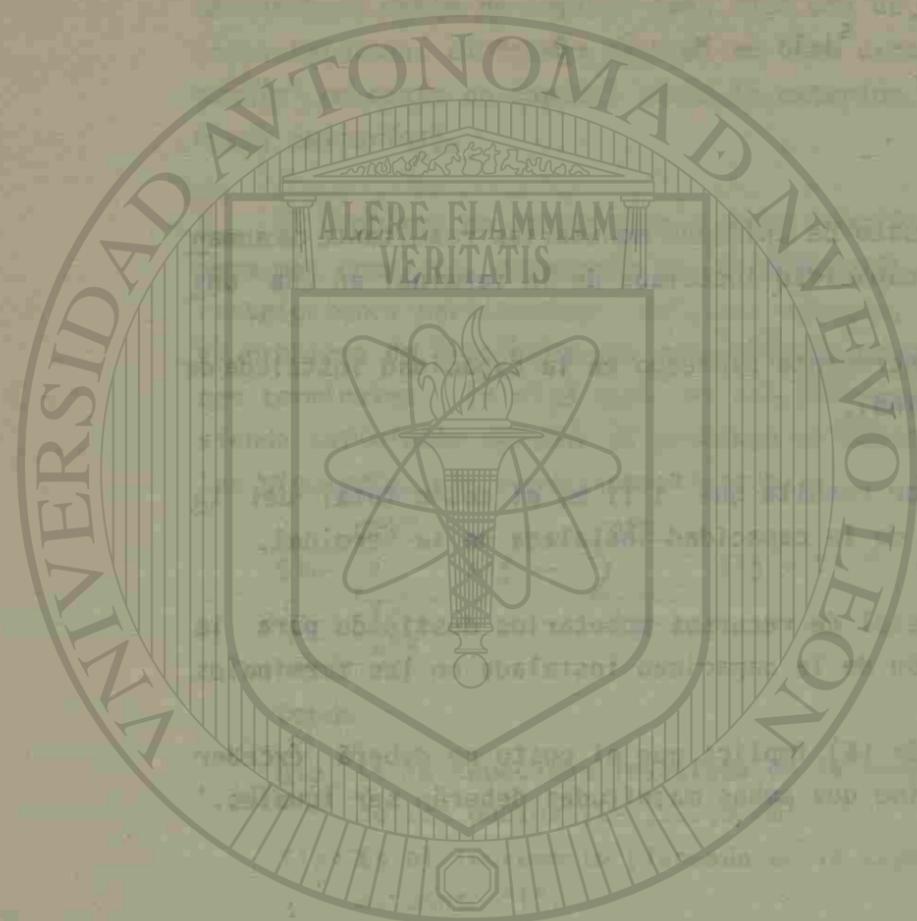
De lo anterior resulta que  $\sum S_i T_i$  es el costo total del incremento planeado de la capacidad instalada de la terminal.

$M_2$ : Es el total de recursos monetarios destinado para la expansión de la capacidad instalada en las terminales.

La restricción (6) implica que el costo no deberá exceder al presupuesto, sino que ambas magnitudes deberán ser iguales.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS



## BIBLIOGRAFIA GENERAL

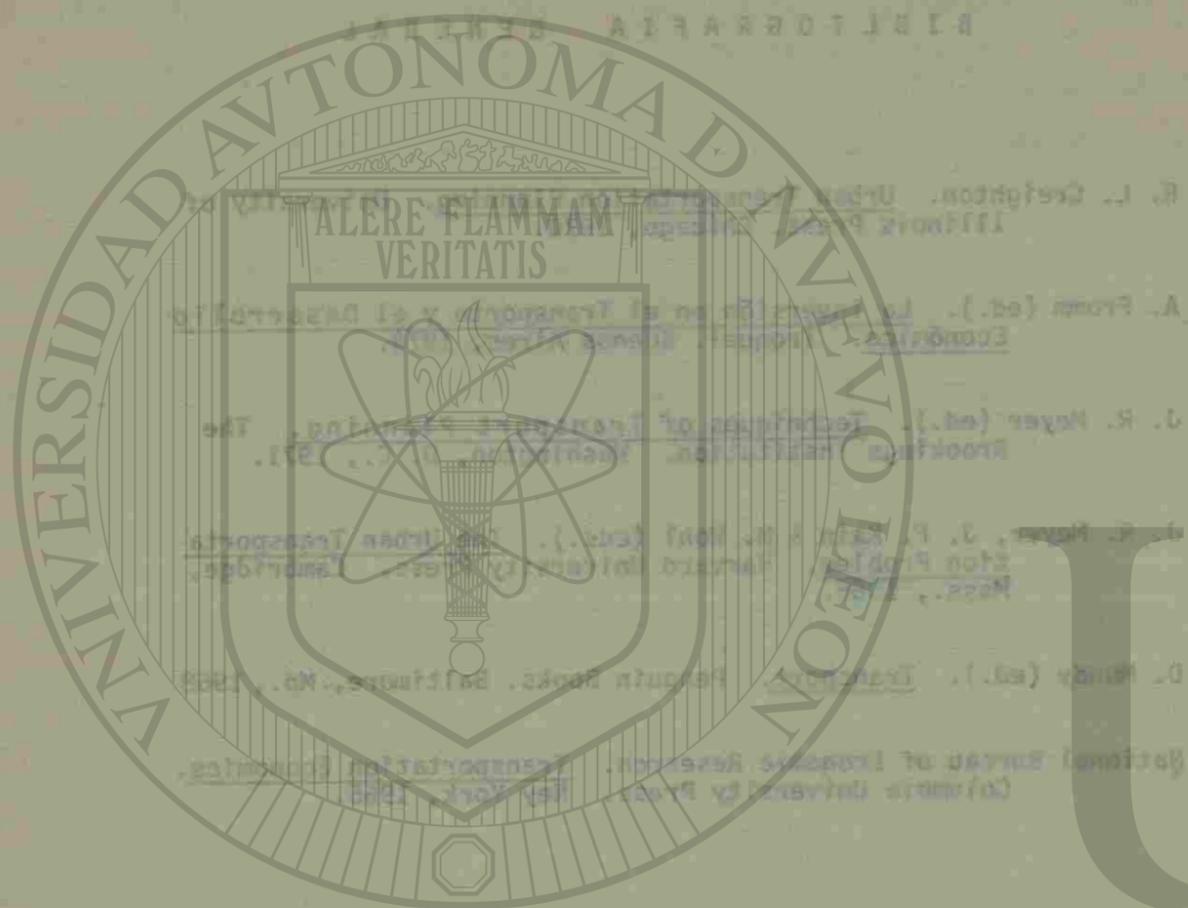
- R. L. Creighton. Urban Transportation Planning. University of Illinois Press. Chicago, 1970.
- A. Fromm (ed.). La Inversión en el Transporte y el Desarrollo Económico. Troquel. Buenos Aires, 1974.
- J. R. Meyer (ed.). Techniques of Transport Planning. The Brookings Institution. Washington, D. C., 1971.
- J. R. Meyer, J. F. Kain & M. Wohl (eds.). The Urban Transportation Problem. Harvard University Press. Cambridge, Mass., 1965.
- D. Mundy (ed.). Transport. Penguin Books. Baltimore, Md., 1968.
- National Bureau of Economic Research. Transportation Economics. Columbia University Press. New York, 1965.

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





Se terminó de imprimir en diciembre de 1982, en el Departamento de Impresos de la Facultad de Economía, de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Loma Redonda No. 1515 Pte., Col. Loma Larga, Monterrey, N.L., México. Se tiraron 500 ejemplares más sobrantes para reposición.

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

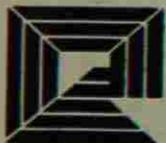




JUAN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECA



FACULTAD DE ECONOMÍA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS