

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

De esta manera, el problema de maximización^{13/} puede plantearse así:

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

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:

^{13/} 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^{14/} que se tendrá que pagar, dado un determinado nivel de ingreso, a las unidades familiares con in

^{14/} 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:

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

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

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

- El primer término del segundo lado de la ecuación (1¹) representa 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 insuficientes.

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

$$r^k \geq 0 \\ \text{y } v_i \geq 0$$

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^{15/} 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,^{16/} tenemos:

$$V_k = a + bZ_1^k + cZ_2^k + dZ_3^k + eN^k + \mu$$

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

^{15/} Tales como escolares, comunitarias o de utilización del tiempo libre.

^{16/} Por ejemplo, después de haber ensayado una serie de ajustes diferentes y utilizar criterios de bondad de ajuste.

brá dos o tres^{17/} 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 topogra

^{17/} 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^{18/} 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^{19/} 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.^{20/}

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

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

$$\left[\begin{array}{c} \sum_{j=1}^n T_{ij} G_i \\ \hline \sum_{j=1}^n T_{ij} G_j \end{array} \right]$$

Donde:

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

T_{ij} = Intercambio ente Zonas Total Presente.

G_j = Factor de Crecimiento de la Zona "j"

^{20/} Supuesto que en realidad es inadmisibile 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.

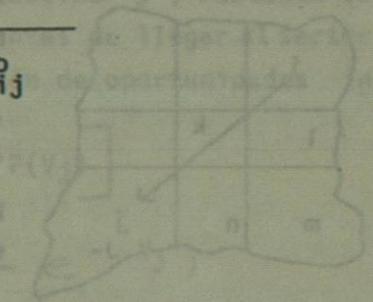
El Modelo de Física Social o de Gravedad.- Este modelo es el que se utiliza en mayor medida para la proyección de los flujos entre zonas de un área urbana. Determina un conjunto de flujos con origen en un punto^{21/} dado y con destino en cualquier otro punto perteneciente al área urbana bajo estudio.

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

^{21/} 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),^{22/} 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".

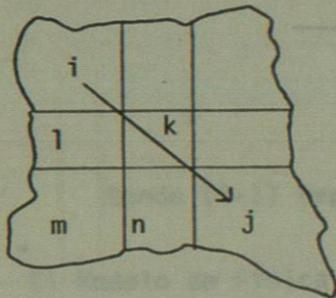
En este modelo, los parámetros a estimar son:

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

^{22/} La potencia "b" de la variable distancia en un parámetro a determinar.

El Modelo de Oportunidades Intermedias.^{24/} 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.

^{24/} 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:

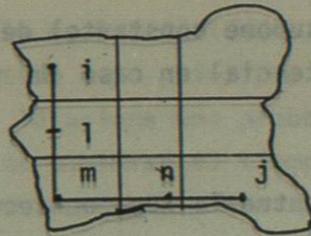
$$T_{ij} = O_i (e^{-L V_{j+1}} - e^{-L V_j})$$

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".^{26/}

$V_j + 1$ 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:

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

^{26/} Recuérdese que se trata de viajes que siempre se inician en el punto "j".



- V_l: Número de viajes de "i" a "l"
- V_m: Número de viajes de "i" a "m"
- V_n: Número de viajes de "i" a "n"
- V: 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.^{27/} 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.

^{27/} 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